



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

정규수치변환과 앙상블칼만필터를 이용한 채널저류층 특성화

Characterization of Channel Reservoirs
Using Ensemble Kalman Filter with Normal
Score Transform

2017 년 2 월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

박 준 규

정규수치변환과 앙상블칼만필터를 이용한 채널저류층 특성화

Characterization of Channel Reservoirs
Using Ensemble Kalman Filter with Normal
Score Transform

지도교수 최 종 근

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2017 년 2 월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

박 준 규

박준규의 석사학위논문을 인준함

2017 년 2 월

위 원 장 _____ 박 형 동 (인)

부 위 원 장 _____ 최 종 근 (인)

위 원 _____ 송 재 준 (인)

초 록

미래생산량을 예측하고 합리적인 의사결정을 내리기 위해 저류층 특성화는 중요하다. 앙상블칼만필터(ensemble Kalman filter, EnKF)는 다수의 저류층모델을 활용하여 저류층특성인자를 실시간으로 교정하고 미래생산에 대한 불확실성을 평가하는 방법이다.

채널저류층은 사암과 셰일의 두 암상으로 이루어져 저류층물성치가 정규분포를 따르지 않는다. EnKF는 정규분포를 가정하므로 EnKF만을 사용한 채널저류층 특성화에서는 유체투과율을 합리적으로 추정할 수 없다.

본 연구는 채널저류층의 특성화를 위해 필터와 정규수치변환을 사용한 EnKF를 제안한다. 필터를 사용하여 저류층의 특정 방향으로의 채널 연결성을 강화하고, 정규수치변환을 이용해 EnKF의 정규분포 가정을 만족할 수 있다. 또한 EnKF의 교정결과를 정규수치역변환을 통해 이봉분포를 보존한다.

제안방법을 초기 저류층모델이 참조모델과 동일한 방향성을 가진 경우와 다른 방향성을 가진 경우에 대해 적용하였다. 그 결과 오버슈팅과 언더슈팅을 해결하고 채널저류층의 이봉분포를 유지하였으며 채널 연결성과 패턴을 신뢰할 수 있게 파악하였다. 따라서 제안방법은 불확실성을 줄여 성공적으로 오일과 물의 미래생산량을 예측할 수 있다.

주요어: 저류층 특성화, 앙상블칼만필터, 정규수치변환, 필터

학 번: 2015-21318

목 차

초 록.....	I
목 차.....	II
L i s t o f Tables.....	IV
L i s t o f Figures.....	V
 1. 서론.....	 1
 2. 배경이론	 9
2.1 채널저류층.....	9
2.2 다점지구통계 예측기법.....	14
 3. 앙상블기반기법을 이용한 동적자료 통합.....	 19
3.1 앙상블칼만필터.....	19
3.2 필터와 점수모델.....	23
3.3 정규수치변환.....	28
3.4 필터와 정규수치변환을 이용한 채널저류층 특성화.....	30
 4. 제안방법의 적용 및 검증.....	 32
4.1 동일한 방향의 초기모델을 갖는 채널저류층.....	33
4.2 다양한 방향의 초기모델을 갖는 채널저류층.....	52

5. 결론.....	69
참고문헌.....	72
ABSTRACT.....	7

List of Tables

Table 4.1 Reservoir parameters of case
1 3 6

Table 4.2 Well locations and operating conditions of case
1 3 6

Table 4.3 Petrophysical parameters for simulation
... .. 3 7

Table 4.4 Comparison of the three history matching methods in
c a s e 1 5 1

Table 4.5 Reservoir parameters of case
2 5 4

Table 4.6 Well locations and operating conditions of case
2 5 5

Table 4.7 Petrophysical parameters for simulation
... .. 5 5

Table 4.8 Comparison of the three history matching methods in
c a s e 2 6 8

List of Figures

F i g u r e 1 . 1 R e s e r v o i r characterization.....	2
Figure 1.2 Procedures for characterizing channel r e s e r v o i r s	8
F i g u r e 2 . 1 M e a n d e r r i v e r (H y n e , 2 0 1 2)	11
Figure 2.2 Types of channel reservoirs (Hyne, 2 0 1 2)	11
Figure 2.3 Propagation of injected water in the channel reservoir	13
Figure 2.4 Training image and conditional probability	5
Figure 2.5 Examples of observed phenomenon and its TI	6
F i g u r e 2 . 6 F l o w c h a r t o f S N E S i m	18
F i g u r e 3 . 1 F l o w c h a r t o f E n K F	21

Figure 3.2 Examples of 3 types of filters	25
Figure 3.3 Filter application to a pattern to get filter score	25
Figure 3.4 Application filter to pattern to get score model	27
Figure 3.5 Conceptual diagram of normal score transform and inverse normal score transform	29
Figure 3.6 Flow chart of the proposed method	31
Figure 4.1 TI and reference model of case 1	35
Figure 4.2 Observed well data of the reference field: case 1	38
Figure 4.3 Average log permeability of the initial ensemble in case 1	40
Figure 4.4 Examples of log permeability field of the initial ensemble members.....	40

Figure 4.5 Predictions of well oil and water productions of the initial ensemble :	
case 1.....	41

Figure 4.6 The reference field and average log permeability fields updated by the three methods : case 1	43
--	----

Figure 4.7 Log permeability fields and their histograms of the updated ensemble members in case 1	45
---	----

Figure 4.8 Predictions of oil production rates of the updated ensembles by the three methods : case 1	48
---	----

Figure 4.9 Predictions of watercut of the updated ensembles by the three methods : case 1	50
---	----

Figure 4.10 Training images used in case
2 5 3

Figure 4.11 Reference model of channel reservoir in case
2 5 4

Figure 4.12 Observed well data of the reference field: case 2
... .. 5 6

Figure 4.13 Average log permeability of the initial ensembles in
c a s e 2 5 8

Figure 4.14 Examples of log permeability fields of the initial
e n s e m b l e
m e m b e r s
... .. 5 8

Figure 4.15 Predictions of well oil and water productions of the initial
e n s e m b l e :
case 2.....59

Figure 4.16 The reference field and average log permeability
f i e l d s u p d a t e d b y
t h e t h r e e m e t h o d s : c a s e
2 6 1

Figure 4.17 Log permeability fields of the updated ensemble members ... 6 2

Figure 4.18 Predictions of oil production rates of the updated ensembles by the three methods : case 2 ... 6 5

Figure 4.19 Predictions of watercut of the updated ensembles by the three methods : case 2 ... 6 7

1. 서론

석유가스 자원개발을 위한 Exploration & Production (E&P) 사업은 다른 사업과 비교하여 투자규모가 크고 사업기간이 길다. 또한 석유가스자원은 지하에 존재하기 때문에 개발 전후로 얻을 수 있는 자료의 양이 제한되어 있다. 따라서 대상 저류층의 유체유동에 대한 불확실성이 존재한다.

이로 인해 E&P사업의 탐사, 시추계획, 생산계획, 추가 시추계획 및 지분매각 등의 단계에서 의사결정에 어려움이 있다. 잘못된 의사결정으로 인해 목표한 계획을 지키지 못할 경우 큰 손해를 유발할 수 있다. 따라서 합리적인 의사결정을 위해서 신뢰할 수 있는 저류층모델링이 필요하다.

저류층 특성화는 사용가능한 정보를 통합하여 저류층의 석유공학적 물성치들을 추정하는 방법이다. 사용가능한 정보는 시간에 따라 변하지 않는 정적자료와 시간에 따라 변화하는 동적자료로 구분된다. 정적자료에는 지질정보, 코어자료, 로깅자료 등이 있으며 정적자료를 바탕으로 지구통계기법을 사용하여 초기 저류층모델을 만들 수 있다. 하지만 정적자료는 제한된 위치에서 얻을 수 있어 자료의 양이 한정되고 불확실성이 크기 때문에 초기 저류층모델은 실제 저류층을 정확히 묘사하기 어렵다.

이를 위해 유정 생산량자료 혹은 공저압력과 같은 시간에 따라

변화하는 동적자료를 함께 사용한다. 동적자료통합은 실제 저류층의 생산이력과 저류층모델의 예측값의 오차를 최소화하는 과정으로 히스토리매칭(history matching)으로도 불린다. Fig. 1.1은 저류층 특성화의 과정을 보여준다.

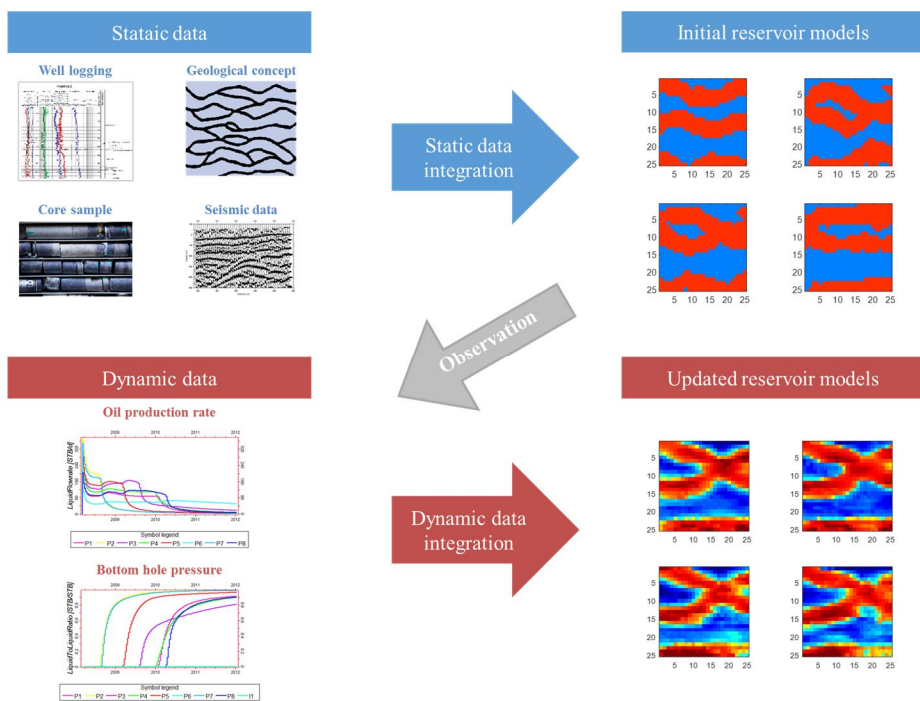


Fig. 1.1 Reservoir characterization
(Caers and Zhang, 2004; Gettyimages, accessed in 2016;
Wikipedia, accessed in 2016).

앙상블기반기법(ensemble-based method)는 등가확률을 갖는 다수의 저류층모델을 이용하여 생산량을 예측하고 불확실성을 평가하는 방법이다. 하나의 저류층모델만을 특성화할 경우 실제 저류층과의 차이가 발생할 수 있다. 다수의 모델을 이용하면 각 모델의 오차를 계산할 뿐만 아니라 전체 모델들의 불확실성을 평가할 수 있는 장점이 있다.

Kalman(1960)은 관측값과 관측오차를 이용하여 모델인자를 교정하는 칼만필터(Kalman filter)를 제안하였다. 이는 하나의 모델을 사용하며 선형시스템에만 적용가능한 단점이 있었다. Evensen(1994)은 칼만필터를 이용하여 비선형문제에도 적용할 수 있는 앙상블칼만필터(ensemble Kalman filter, EnKF)를 제안하였다. 이후 EnKF는 기상학, 해양학 등에서 활용되었으며 Nævdal 등(2002)은 석유공학에 EnKF를 처음으로 활용하여 유체투과율을 특성화하였다.

EnKF를 이용한 저류층 특성화는 저류층모델을 실시간으로 교정할 수 있으며 상용소프트웨어와 결합이 용이하다. 공극률, 유체투과율, 대수층 크기와 채널정보와 같은 다양한 저류층인자를 교정할 수 있으며 교정을 위한 동적자료에도 제한을 받지 않는다. 또한 다수의 저류층모델을 이용하여 최종모델의 불확실성을 평가할 수 있으며 확실한 수학적 기반을 가진다.

EnKF는 교정수식을 유도하는 과정에서 몇 가지 가정을 전제로 갖는다. 등가확률을 갖는 다수의 저류층모델의 수는 충분히 크고

서로 독립이며 그 인자의 분포는 정규분포를 따른다고 가정한다.

이러한 가정을 만족하는 경우에는 EnKF를 이용하여 신뢰할 수 있는 히스토리매칭을 수행할 수 있었다(Nævdal et al., 2002; Gu and Oliver, 2004, 2006; Evensen et al., 2007). 하지만 관심 인자가 위의 가정을 만족하지 않을 경우 EnKF는 오버슈팅(over-shooting), 언더슈팅(under-shooting)과 필터발산(filter divergence)문제가 발생하였다 (정승필, 2008; Shin et al., 2010; Lee et al., 2013a, 2013b, 2014; 이경복, 2014).

오버슈팅은 교정된 모델인자의 특성값이 너무 큰 값을 갖는 문제이다. 이는 EnKF가 교정되는 모델인자의 물리적 의미를 고려하지 않고 수식만으로 교정하기 때문이다. 오버슈팅이 발생할 경우 공극률이 1보다 큰 값을 가질 수도 있으며 지나치게 큰 유체투과율을 가질 수 있다.

언더슈팅은 오버슈팅과 교정된 모델인자의 특성값이 너무 작은 값을 갖는 문제이다. 오버슈팅과 같은 이유로 발생하며 공극률이 음수를 가지거나 유체투과율이 지나치게 작게 나타날 수 있다.

필터발산은 다수의 초기모델이 교정 후 모델간 유사성이 높아져 하나의 저류층모델로 수렴하는 문제이다. 모델들이 서로 비슷하기 때문에 평균과의 오차도 작아져 추정오차공분산이 작아지게 되고 추가 관측자료로 교정하여도 모델인자의 변화가 없어 추가교정이 불가능하게 된다. 최근에는 EnKF의 가정들을 만족하지 못하는 경우에도 성공적인 특성화를 위한 연구가

진행되고 있다.

우선 저류층인자가 정규분포를 따르지 않은 경우에 대한 연구이다. Jafapour와 McLaughlin(2007)은 저류층의 주요특징을 추출하고 이봉분포를 정규분포로 변환하기 위해 이산코사인변환(discrete cosine transform, DCT)를 사용하였다. DCT와 EnKF를 채널저류층에 적용하여 히스토리매칭을 수행하였다(Jafapour and McLaughlin, 2007, 2008, 2009). 하지만 교정 후의 저류층모델의 채널경계가 명확하지 않으며 오버슈팅의 문제가 발생하였다.

이충호(2016)와 Kim et al.(2016)은 사암과 셰일의 비율을 사전에 가정하고 교정결과에 이를 반영하는 암상비율보존법(preservation of facies ratio)을 DCT와 EnKF에 결합하였다. 이를 통해 채널경계를 명확히 하여 DCT의 단점을 해결하였다.

Shin 등(2010)은 비모수접근법(non-parametric approach)으로 대상 저류층의 확률분포를 정규분포로 변환하여 EnKF의 가정을 해결하였다. 이때 자료를 정규분포로 변환하기 위해 정규수치변환(normal score transform, NST)를 사용하였다. Zhou 등(2012a, 2012b)도 NST와 EnKF를 결합하여 채널저류층을 특성화하였으며 해당 기법을 NS-EnKF(normal score-EnKF)라고 명명하였다.

조홍근(2016)은 주성분분석(principal component analysis, PCA)을 통해 초기모델의 특징을 추출하여 이를 EnKF에 입력자료로 사용하였다. 추출된 정보는 정규분포를 따르므로 기존 EnKF의

가정을 해결하고 결과를 역정규수치변환(inverse normal score transform, INST)을 이용하여 이분분포로 유지하여 성공적으로 특성화를 수행하였다.

앙상블모델의 평균을 참값으로 보는 가정에 대한 연구도 진행되었다. 먼저 초기 저류층모델이 참조모델과 다른 경향성을 띄는 것에 대한 연구이다. Watanabe 등(2009)과 Lee 등(2011)은 참조모델과 초기모델의 유체투과율 경향을 다르게 하였다. 참조모델과 다른 주 방향을 갖는 초기모델들을 생성하여 지질학적 불확실성을 크게 설정하였다.

Lee 등(2013a)은 초기모델들을 거리기반기법을 통해 유사한 정도에 따라 몇 개의 그룹으로 분류하였다. 이후 EnKF를 적용하여 앙상블모델들의 평균과 참값이 다른 경우에도 모델인자를 특성화하고 미래생산량을 예측할 수 있었다.

기존 채널저류층에 EnKF를 적용한 연구에는 다음과 같은 한계가 있다. 첫 번째로 채널저류층의 사암과 셰일의 명확한 경계를 확보하지 못하였다. 교정결과에 셰일과 사암이 섞여서 위치하게 되어 지질학적 사실성을 반영하지 못하였다.

두 번째로 기존의 연구는 초기 저류층모델과 참조모델에 동일한 TI 를 사용하였다. 참조모델과 동일한 방향성과 지질적 특성을 갖는 모델들은 보다 더 쉽게 교정될 수 있으나, 실제 현장에서 저류층의 TI 를 얻을 수 없는 경우 기존방법의 효율이 떨어지게 된다. 그러므로 참조모델과 다른 TI 에서 만들어진

초기모델들을 성공적으로 특성화할 수 있는 방법이 필요하다.

세 번째로 기존의 EnKF에 비해 계산시간이 증가하는 단점이 있다. 조홍근(2016)의 경우 저류층 크기와 차원에 따라 초기모델들의 주성분을 분석하는 시간이 소요될 수 있다. 따라서 채널저류층의 지질학적 특성을 잘 반영하며 지질정보가 부족한 경우에도 채널저류층의 특성화를 수행할 수 있는 새로운 방법을 제안할 필요가 있다.

본 연구의 핵심목적은 채널의 특징을 만족하는 채널저류층 특성화와 생산량예측 및 불확실성평가이다. 이를 위해 선형필터와 NST를 사용한 EnKF를 제안하며 Fig. 1.2는 본 연구의 흐름도이다. 유정의 코어자료와 TI 를 이용하여 다수의 초기 채널저류층모델을 생성한다. 초기모델에 선형필터를 적용하여 초기모델의 방향성을 교정한다.

필터를 적용한 초기모델들에 NST를 이용하여 이봉분포의 자료를 정규분포로 만든다. 동적자료 통합을 위해 EnKF를 사용한다. 교정된 사암과 셰일의 유체투과율을 기존에 알려진 채널정보를 이용하여 원래의 저류층인자값으로 복원한다. 마지막으로 교정된 채널저류층을 이용하여 미래생산량예측과 불확실성평가를 수행한다.

본 논문은 총 5장으로 구성된다. 1장 서론에서는 본 연구의 필요성과 기존연구들의 한계점을 파악한다. 2장에서는 채널저류층과 초기 저류층모델 생성에 관련된 다점지구통계기법을 설명한다. 3장에서는 본 연구의 방법론을 설명하고 선형필터와 NST를 사용한

EnKF를 제안한다. 4장에서는 하나의 TI와 복수의 TI 를 사용한 2차원 채널저류층 특성화를 수행한다. 5장에서는 본 연구의 결론을 정리하고 연구내용을 요약한다.

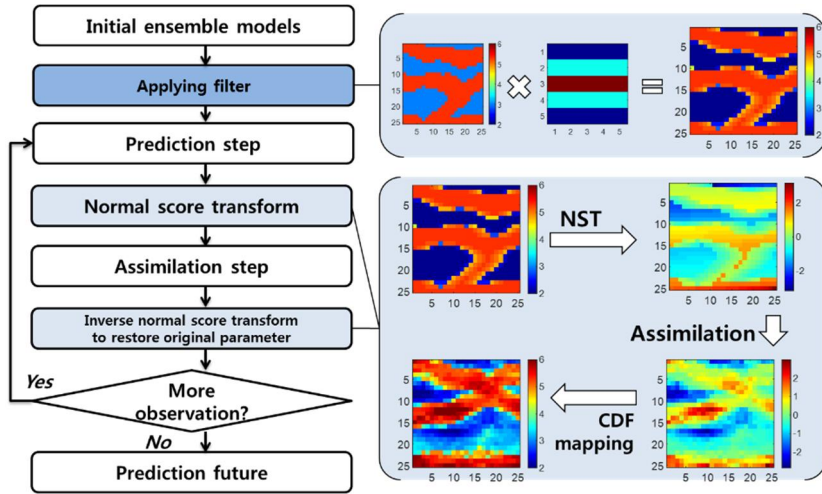


Fig. 1.2 Procedures for characterizing channel reservoirs.

2. 배경이론

자연에 존재하는 물성값은 대부분 로그정규분포를 따른다. 따라서 일반적인 저류층의 경우 두 지점의 자료값의 차이를 이용하여 저류층 특성값의 공간분포를 파악하는 두점지구통계기법을 사용한다. 하지만 두점지구통계기법은 채널저류층의 강한 연결성과 패턴을 반영하지 못한다. 이 장에서는 채널저류층의 퇴적환경과 특징을 기술하고 채널저류층의 지질구조를 반영할 수 있는 다점지구통계기법을 소개한다.

2.1 채널저류층

석유가스자원을 저장하고 있는 저류층의 대표적인 암석으로는 사암과 탄산암이 있다. 이중 사암저류층은 전체 저류층의 60%를 차지하며 이는 중동지역을 제외하면 더 높은 비율로 나타난다(Bjørlykke & Jahren, 2010). 사암저류층은 사막, 해안, 하천, 삼각주 등에서 형성되며 이중 채널저류층은 하천과 삼각주에서 많이 생성된다.

대부분의 하천은 뱀의 기어가는 모양과 비슷하여 사행천(meander river)이라 부른다(Fig. 2.1). 이때 하천 안쪽과 바깥쪽의 속도 차이로 인해 바깥쪽은 침식이 발생하고 안쪽은

퇴적물이 쌓이게 된다. 하천 안쪽의 퇴적물에 세일과 같은 덮개암이 쌓이게 되면 우각호(point bar)가 생성된다(Fig. 2.2a). 또한 하천이 수송할 수 없을 만큼 많은 양의 퇴적물이 지나가면 Fig 2.2b와 같이 망상하천(braided river)을 형성한다. 하천 하류가 호수나 해안으로 빠져나가는 삼각주에서는 하천과 바다의 영향으로 Fig 2.2c와 같이 분류하천(distributary river)이 생성된다(Hyne, 2012). 이와 같이 채널저류층은 일정한 퇴적환경에 따라 서로 다른 분포패턴과 횡적·종적 연결성을 갖는다(이용일, 1993).

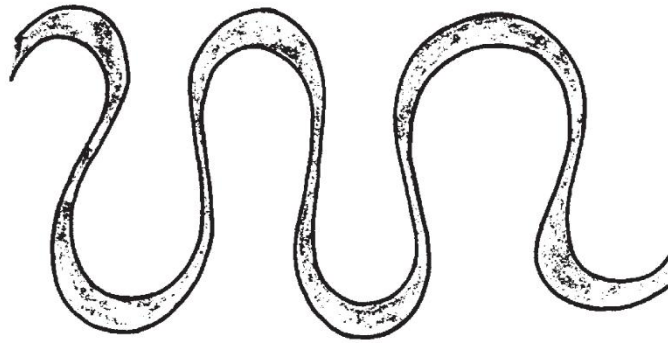
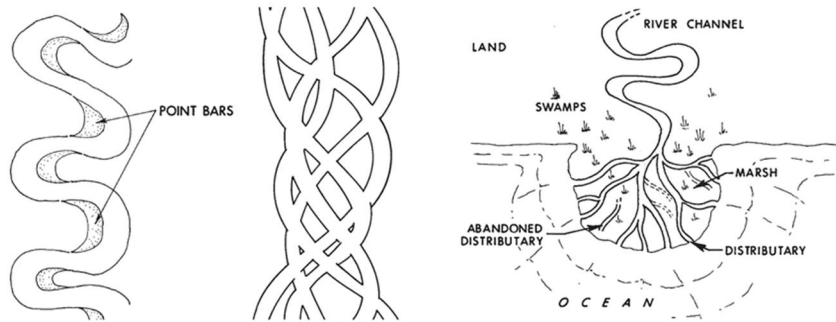


Fig. 2.1 Meander river (Hyne, 2012).



(a) Point bar

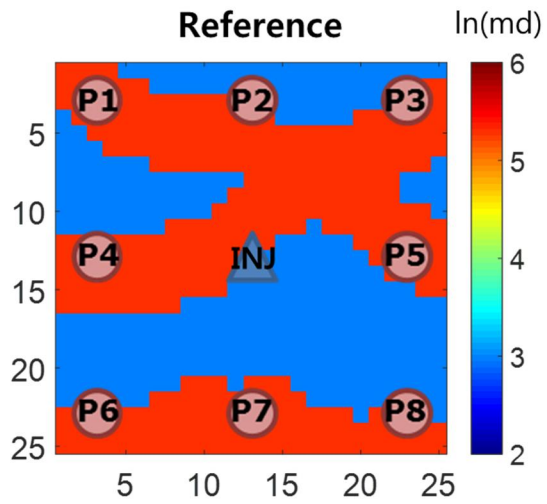
(b) Braided river

(c) Distributary river at delta

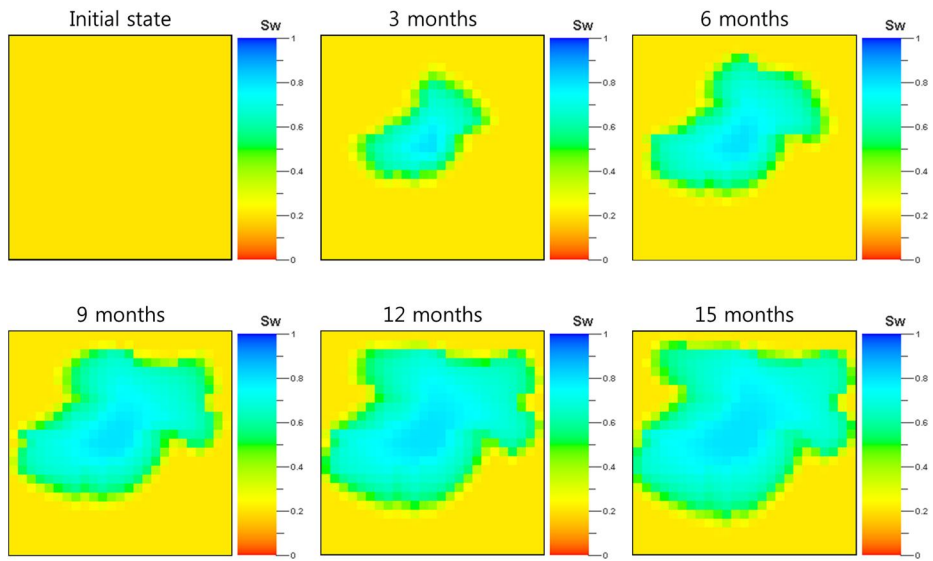
Fig. 2.2 Types of channel reservoirs (Hyne, 2012).

Fig. 2.3a는 본 연구에서 참조모델로 사용한 이차원 채널저류층으로 횡방향으로의 연결성과 중앙의 주입정으로부터 1번에서 5번까지의 생산정이 사암체로 연결되어 있다. Fig. 2.3b는 생산을 시작한 후의 물포화도의 변화로 사암체의 분포패턴을 따라 빠르게 물포화도가 증가하였으며 셰일과의 경계면에서 천천히 증가하는 것을 확인할 수 있다.

이처럼 사암체의 연결성이 채널저류층의 거동에 막대한 영향을 미친다. 하지만 채널저류층은 저류층 특성값이 이봉분포를 이루고 경계면에서 비균질성이 크게 나타나기 때문에 기존의 앙상블기반기법은 오버슈팅과 필터발산의 문제가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 채널의 분포패턴과 연결성을 확보할 수 있는 필터와 NST를 이용한 EnKF를 제안하고자 한다.



(a) 2D channel reservoir



(b) Water saturation over time

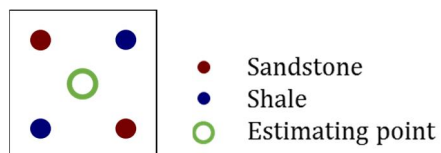
Fig. 2.3 Propagation of injected water in the channel reservoir.

2.2 다점지구통계 예측기법

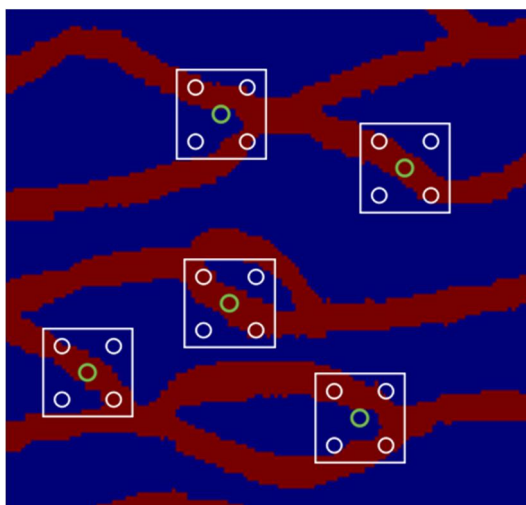
저류층모델은 사전에 얻을 수 있는 코어자료, 로깅자료, 지질정보 등을 지구통계기법으로 통합하여 생성된다. 공간적으로 분포하는 자료를 예측하는 대표적인 기법으로는 픽셀기반기술, 객체기반기술, 그리고 다점지구통계기법이 있다(최종근, 2013).

픽셀기반기술은 한 번에 한 지점의 값을 예측할 수 있으며 대표적인 기법으로 크리깅(kriging)이 있다. 이는 주어진 정적자료를 보존하기 쉬우며 사용이 용이하나 채널저류층과 같이 패턴을 모사하는데 한계가 있다. 객체기반기술은 하나의 대상이나 패턴의 단위를 여러 지점에 걸쳐 배정하는 방법으로 특정 패턴단위를 바로 이용하여 지질구조를 잘 나타낼 수 있으나 주어진 자료를 보존하기 어렵다.

다점지구통계기법은 위 두 방법의 단점을 극복하여 장점을 결합한 방법이다. 객체기반기술과 같이 지질패턴을 보존할 뿐 아니라 픽셀기반기술처럼 주어진 자료를 보존할 수 있다. 지질적 개념도인 TI로부터 조건부확률을 얻어 저류층인자값을 격자단위로 생성할 수 있다(Fig. 2.4).



(a) Search template



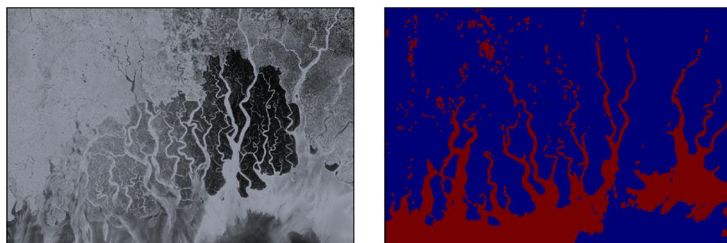
(b) Examples of searching pattern in training image

Fig. 2.4 Training image and conditional probability.

TI는 지질구조 전문가의 제안에 의한 패턴이나 항공사진 등을 활용하여 생성할 수 있다. Fig. 2.5a는 사행천의 항공사진과 이를 묘사하기 위한 TI이다. 사행천의 TI는 사인 곡선으로 패턴을 묘사할 수 있다. Fig 2.5b은 방글라데시 순다르반 지역의 흑백 위성사진과 이를 이용하여 제작한 TI이다. 하천이 지나가는 부분과 삼각주가 형성되는 부분을 중심으로 TI 를 제작할 수 있다.



(a) Meander river (Caers & Zhang, 2004; Gettyimages, accessed in 2016)



(b) Delta in the Sundarbans area (Mariethoz & Caers, 2014)

Fig. 2.5 Examples of observed phenomenon and its TI.

다점지구통계기법은 Guardiano와 Srivastava(1993)에 의해 제안되었으며 Strebel과 Journel(2001)이 제안한 탐색트리(search tree)에 의해 개선되었다. 오직 한 번의 TI 검색을 통해 조건부확률을 계산하여 다점지구통계기법의 계산효율을 증가시켰다. SNESim(single normal equation simulation)은 탐색트리를 이용한 기본적인 다점지구통계기법으로 순서는 Fig. 2.6과 같다.

먼저 해당 저류층의 지질특성을 잘 반영한 TI 를 생성한다. 이후 TI 검색을 위한 데이터 템플릿(data template)을 설정한다. 설정된 데이터 템플릿으로 탐색트리를 작성하여 TI의 공간분포를 조건부확률로 나타낸다. 조건부확률을 이용해 누적확률함수를 구하고 난수를 발생시켜 해당 격자의 특성값을 배정한다. 일련의 과정을 빈 격자가 없을 때까지 반복한다. 최종적으로 얻은 저류층모델을 초기모델로 사용한다.

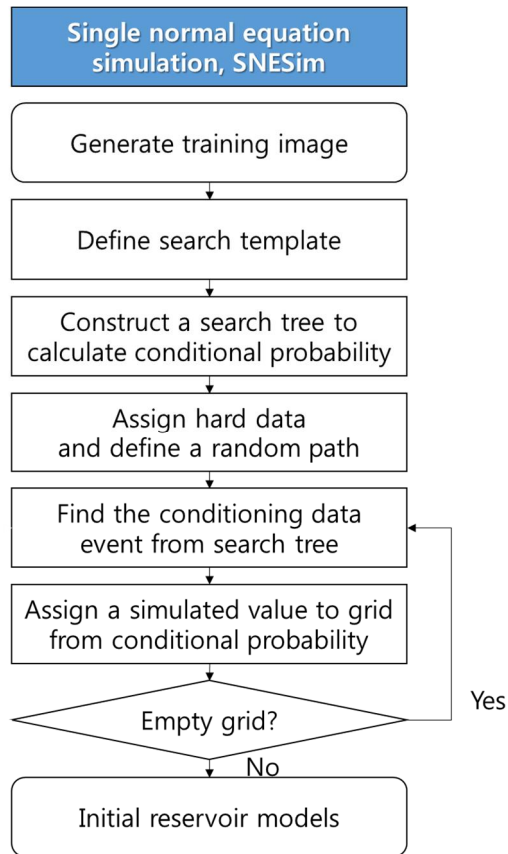


Fig. 2.6 Flow chart of SNESim.

3. 앙상블기반기법을 이용한 동적자료 통합

다점지구통계기법으로 정적자료를 통합하여 만든 초기모델은 참 해와 유사하게 보인다. 하지만, 채널저류층의 특징인 패턴과 유정간 연결성에 있어 참조모델과 차이를 보인다. 신뢰할 수 있는 저류층모델을 얻기 위해 저류층의 생산이력을 이용하여 동적자료 통합을 수행한다.

앙상블기반기법에서는 다수의 저류층모델의 평균을 참 해로 보고 참조모델에서 관측된 생산이력과의 차이를 이용하여 초기모델의 저류층인자를 교정한다.

본 장에서는 대표적인 앙상블기반기법인 EnKF의 수식과 절차를 설명한다. 또한 제안하는 방법에 포함되는 NST와 선형필터 적용에 관해 소개한다. 마지막으로 본 연구에서 제안하는 NST와 선형필터를 사용한 EnKF의 전체 순서도와 효과를 소개한다.

3.1 앙상블칼만필터

EnKF는 불확실성을 포함하는 다수의 저류층모델 예측값의 평균을 참값으로 간주하고 실제 측정값 사이의 추정오차공분산(estimated error covariance)을 최소화하는 방향으로 저류층인자를 교정한다. 다수의 저류층모델을 앙상블이라 부르며 각 앙상블은 정적인자,

동적인자, 시뮬레이션결과로 구성된 상태벡터(state vector)로 나타낸다. 정적인자는 격자의 유체투과율, 공극률 등 시간에 따라 변하지 않는 물성치이며 동적인자는 격자의 압력과 물포화도와 같이 시간에 따라 변하는 물성값을 의미한다. 시뮬레이션결과는 정적 및 동적인자를 이용한 저류층시뮬레이션 결과값인 오일 및 가스 생산량이다. 총 앙상블의 개수를 n_e , 총 교정횟수를 n_t 라고 가정했을 때, i 번째 앙상블에 대한 t 번째 상태벡터는 식 (3.1)과 같이 정의된다.

$$y_{ti} = \begin{bmatrix} m_t^s \\ m_t^d \\ d_t \end{bmatrix}, \quad i = 1, n_e, t = 1, n_t \quad (3.1)$$

여기서 m_t^s 는 정적인자, m_t^d 는 동적인자, d_t 는 시뮬레이션결과로 참조모델의 관측 값에 대응하는 저류층모델의 예측값이다.

EnKF는 예측과 교정의 단계를 반복하며 히스토리매칭을 수행한다. 예측단계에서는 이전단계의 정적인자를 사용하여 저류층 시뮬레이션으로 예측값 d_t 를 계산한다. 본 연구에서는 Schlumberger 社の ECLIPSE 100을 사용하였다.

교정단계에서는 예측값과 관측값 사이의 추정오차공분산을 최소화하는 방향으로 정적인자를 교정하여 다음 시점에서 사용할 정적인자 m_{t+1}^s 을 구한다. 이와 같은 예측과 교정을 반복수행하여 관측값이 존재하는 시점까지 교정을 수행한다. 최종적으로 얻은

정적인자를 바탕으로 미래생산량을 예측하면 앙상블들의 불확실성을 평가할 수 있다. EnKF의 수행과정을 순서도로 나타낸 것이 Fig. 3.1 이다.

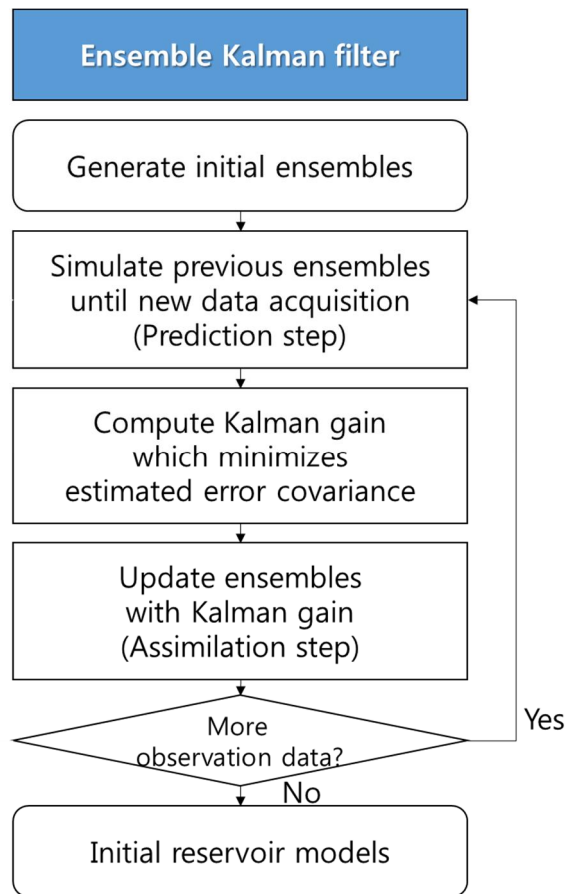


Fig. 3.1 Flow chart of EnKF.

교정단계에서 상태벡터는 식 (3.2)와 같이 교정한다. 이전 시점의 상태벡터에 실제 관측값인 d^{obs} 와 예측값의 차이에 칼만게인(Kalman gain, K)을 곱하여 상태벡터를 교정한다.

$$y^a = y^p + K(d^{obs} - Hy^p) \quad (3.2)$$

여기서, y^a 는 교정 후의 상태벡터, y^p 는 교정 전의 상태벡터를 나타낸다. H 는 측정행렬(measurement matrix operator)로 정적인자, 동적인자, 그리고 예측값으로 구성된 상태벡터에서 예측값만을 추출하는 행렬이다. 그러므로 측정행렬은 0과 1로만 구성된다.

K 는 추정오차공분산을 최소로 하도록 계산되며 식 (3.3)과 같다.

$$K = C_Y^p H^T (H C_Y^p H^T + C_D)^{-1} \quad (3.3)$$

여기서, 위첨자 T 는 전치행렬을 의미하며 C_Y^p 와 C_D 는 각각 교정전의 추정오차공분산과 관측오차공분산(measurement noise covariance)이다.

추정오차공분산은 식 (3.4)와 같으며 추정오차는 식 (3.5)로 정의된다.

$$C_Y = E[ee^T] = \frac{1}{N_e - 1} \sum_{k=1}^{N_e} e_k e_k^T \quad (3.4)$$

$$e \equiv y_t - \hat{y}_t \quad (3.5)$$

여기서, 윗꺼쇠 \wedge 는 참값을 의미한다. 하지만 상태벡터의 참값을 모르므로 EnKF에서는 앙상블의 평균을 참값으로 가정한다. 이러한 가정으로 초기앙상블디자인이 히스토리매칭결과에 큰 영향을 미친다(이경복, 2014).

3.2 필터와 점수모델

채널저류층의 초기앙상블은 다점지구통계기법으로 생성하는 과정에서 TI의 영향을 많이 받는다. 만일 TI의 주향이 참조모델과 다른 방향으로 설정되었다면 SNESim으로 생성되는 초기앙상블의 질은 떨어지게 된다. 또한 추계학적으로 생성되는 초기앙상블 중 참조모델과 동일한 방향성을 띄는 앙상블이 있는 반면 다른 방향성을 갖는 앙상블 또한 존재한다.

따라서 초기앙상블의 방향성을 알맞게 교정해주는 추가적인 과정이 필요하다. 이는 필터를 이용한 점수모델로 해결할 수 있다. 필터는 특정 자료배열에 따른 가중치의 집합으로 정의되며 Wu 등은 필터를 평균, 경사, 그리고 곡률필터 세 가지로 나타내었다(Wu et al., 2006). 식 (3.6)은 평균필터, 식 (3.7)은 경사필터, 그리고 식 (3.8)은 곡률필터이다.

$$f_a(i) = \left| 1 - \left| \frac{i-1}{(n-1)/2} - 1 \right| \right| \quad (3.6)$$

$$f_g(i) = \frac{i-1}{(n-1)/2} - 1 \quad (3.7)$$

$$f_c(i) = \left\lfloor 2 * \frac{i-1}{(n-1)/2} - 2 \right\rfloor - 1 \quad (3.8)$$

여기서 f_a 는 평균필터를, f_g 는 경사필터를, f_c 는 곡률필터를 의미하며 i 는 원점으로부터 거리를, n 은 필터의 크기를 나타낸다.

Fig. 3.2는 두 가지 방향으로 나타낸 세 필터의 예시를 보여준다. 본 연구에서는 채널의 연결성을 강조하기 위해 중앙부분을 영향력을 강화하는 평균필터를 사용하였다. 필터의 크기는 유정간 거리로 설정하였다.

Fig. 3.3은 수평방향과 수직방향의 필터를 수평방향 패턴에 적용한 점수결과이다. 점수는 식 (3.9)로 계산할 수 있다.

$$S(u) = \sum_{i=1}^{n_f} f(h_i) \cdot \text{pat}(u + h_i) \quad (3.9)$$

여기서, $S(u)$ 는 중심위치 u 에서 필터를 거친 점수를 의미한다. n_f 는 필터의 격자수를, $f(h_i)$ 는 h_i 위치의 필터의 값을, $\text{pat}(u + h_i)$ 는 중심 u 로부터 h_i 만큼 떨어진 곳의 패턴의 값을 나타낸다. Fig. 3.3의 경우 필터의 격자수 n_f 는 225이며 패턴의 중심위치 u 는 (8, 8)이다.

두 방향의 필터를 패턴에 적용한 점수는 필터의 방향과 패턴의 방향이 일치할 경우 41.57점, 그렇지 않을 경우 23.86점이다. 이와 같이 필터를 통해 해당 패턴의 방향성을 확인할 수 있으며 방향성이 일치하지 않는 경우 더 낮은 점수를 부여할 수 있다.

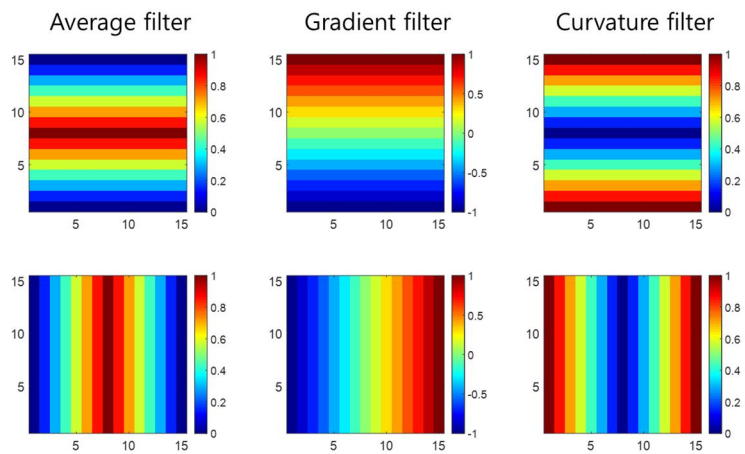


Fig. 3.2 Examples of 3 types of filters.

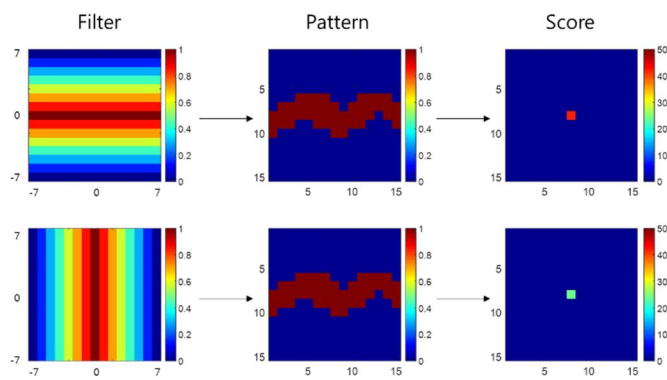


Fig. 3.3 Filter application to a pattern to get filter score.

이를 초기양상블에 적용하기 위해 양상블의 모든 격자를 중심으로 점수를 구한다. 이를 위해 식 (3.10)과 같이 중심위치를 이동시킨다. 점수를 얻기 위한 방법은 식 (3.11)로 앞의 방법과 동일하며 모든 중심위치에서 점수를 계산하여 점수모델을 얻는다는 차이가 있다.

$$u_j = u_0 + h_j, \quad j = 1, n_e \quad (3.10)$$

$$S(u_j) = \sum_{i=1}^{n_f} f(h_i) \cdot \text{pat}(u_j + h_i), \quad j = 1, n_e \quad (3.11)$$

여기서 u_j 는 j 번째 중심위치를, $S(u_j)$ 는 중심위치 u_j 에서의 점수를, n_e 는 양상블의 총 격자수를 의미한다.

위의 수식으로 5x5 크기의 필터를 동일한 패턴에 적용시킨 결과는 Fig. 3.4와 같다. 필터의 방향이 패턴과 동일한 경우 높은 값을 갖는 점수모델을 얻을 수 있으며 필터의 방향이 패턴과 다른 경우 상대적으로 낮은 점수모델을 얻는다. 또한 방향이 동일한 경우 원래 패턴의 연결성을 보존할 수 있었지만, 방향이 다른 경우 패턴의 연결성을 축소시키는 결과를 보였다.

또한 초기에 0과 1로 존재하는 이단분포를 완화시켜 사람의 중심부에서 가장 높은 값을 갖고 세일의 중심부에서 가장 낮은 값을 갖는다. 마지막으로 세일 사이에 사람이 존재하거나 사람 내부에 존재하는 노이즈에 필터를 적용하였다. 그 결과 사람의 연결성을 확보하고 노이즈들을 완화시켰다.

필터와 점수모델을 이용한 채널저류층 특성화의 장점은 다음과 같다.

- 특정 방향으로의 채널연결성을 강화시키고 이와 맞지 않는 방향의 연결성을 약화시켜 점수모델을 통해 초기양상불을 개선할 수 있다.
- 채널저류층의 이단분포를 완화시켜 이후 정규수치변환을 위한 누적확률분포(cumulative probability distribution function, CDF)를 작성할 수 있게 한다.
- EnKF 교정결과 발생할 수 있는 노이즈를 완화할 수 있다.

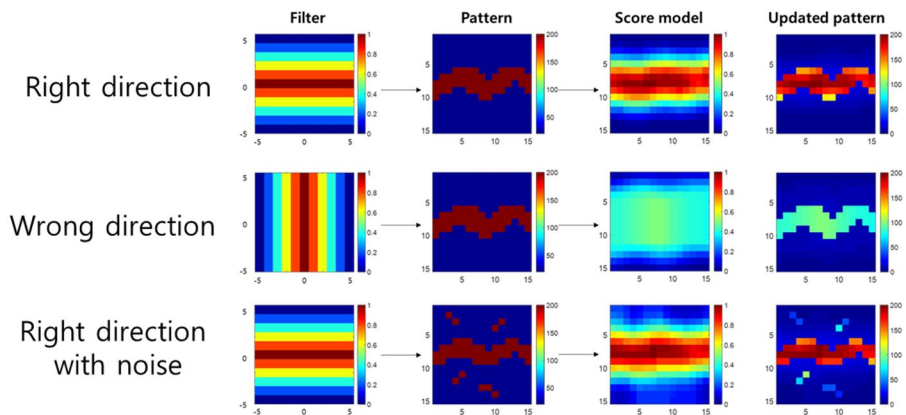


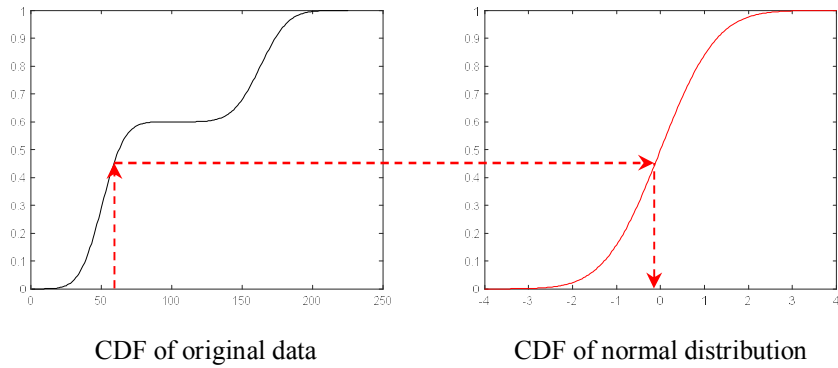
Fig. 3.4 Application filter to pattern to get score model.

3.3 정규수치변환

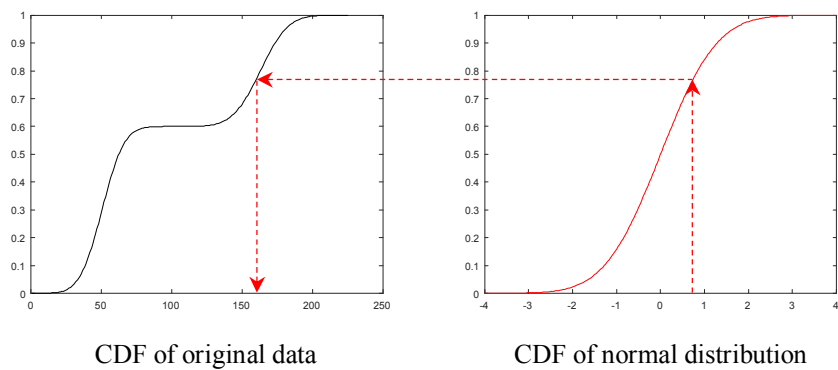
암상이란 구분되는 특징을 갖는 암체를 의미한다(Reading, 1996). 채널저류층은 사암과 셰일의 암상이 구분되어 저류층의 특성값이 이봉분포를 이룬다. 하지만 EnKF의 기본 가정은 저류층인자값이 정규분포를 따르는 것이며 교정결과 또한 정규분포를 따른다.

따라서 이봉분포의 저류층인자값을 EnKF에 사용하기 위해서 이봉분포를 정규분포로 변환하는 전처리와 교정결과를 이봉분포로 복구하는 후처리 과정이 필요하다. 이를 위해 NST와 역과정인 INST를 사용한다.

Fig. 3.5a는 정규수치변환의 과정을 보여준다. 우선 이봉분포의 CDF값을 배정한다. 이를 평균이 0이고 표준편차가 1인 표준정규분포의 CDF에 동일한 누적확률로 일대일 대응시킨다. EnKF로 교정된 결과는 Fig. 3.5b와 같이 채널저류층의 분포특성을 따라 다시 이봉분포로 변환하여 준다. INST도 NST와 동일하게 표준정규분포 인자의 CDF에 동일한 누적확률로 원래 분포의 인자값을 대응시킨다.



(a) Normal score transform



(b) Inverse normal score transform

Fig. 3.5 Conceptual diagram of normal score transform and inverse normal score transform.

NST와 INST를 이용한 채널저류층 특성화의 장점은 다음과 같다.

- 사전에 설정된 비율을 따라 사암과 세일의 경계를 명확하게 할 수 있다.
- EnKF 교정 후에도 저류층인자값을 이봉분포로 유지시킨다.
- EnKF의 문제점인 오버슈팅과 언더슈팅을 해결할 수 있다.

3.4 필터와 정규수치변환을 이용한 채널저류층 특성화

3.2절의 필터와 점수모델을 통해 채널저류층의 연결성을 확보하고 이단분포를 완화시킬 수 있다. 또한 3.3절의 NST와 INST를 통해 EnKF의 정규분포 가정을 만족하고 교정된 저류층인자값을 이봉분포로 변환할 수 있다.

본 연구에서 제안하는 필터와 정규수치변환을 사용한 EnKF의 순서도는 Fig. 3.6과 같다. 일반적인 EnKF와 다른 점은 크게 두 가지이다. 우선 예측단계 전 초기앙상블모델에 필터를 적용하여 점수모델을 얻었다. 얻어진 점수모델을 초기앙상블에 다시 곱하여 주된 방향으로의 연결성을 강화시키고 이진분포를 완화하였다.

또한 EnKF를 수행하는 과정에서 교정 전 NST를 통해 이봉분포를 정규분포로 변환하였다. 이로써 EnKF의 정규분포 가정을 만족하였다. 교정 후 얻어진 정규분포의 결과를 INST를 사용하여 채널저류층 특성값의 이봉분포를 유지하였다.

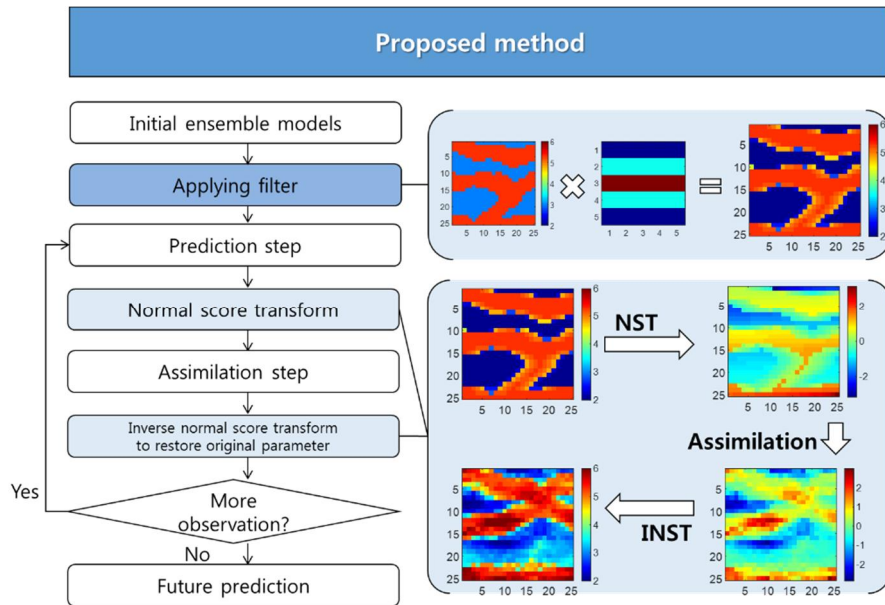


Fig. 3.6 Flow chart of the proposed method.

4. 제안방법의 적용 및 검증

저류층 특성화의 목적은 신뢰할 수 있는 저류층모델을 구축하고 미래생산량 예측과 불확실성평가를 수행하여 저류층 개발 및 평가 시 의사결정의 근거를 제공하는 것이다. 4장에서는 채널저류층의 유체투과율을 특성화하였다. 일반적인 EnKF와 NST를 이용한 EnKF(NST-EnKF)를 제안방법의 대조군으로 설정하여 필터를 사용한 NST-EnKF와 비교하였다.

히스토리매칭에 앞서 정적자료 통합을 수행하기 위해 SGeMS(Stanford geostatistical modeling software)를 사용하였다. TIgenerator 모듈로 TI를 만들고 SNESim 모듈을 통해 초기 채널저류층모델을 생성하였다. EnKF, NST-EnKF, 그리고 제안방법의 수행은 MATLAB을 사용하여 자동화하였다.

4.1절에서는 2차원 채널저류층에서 초기모델의 방향성이 참조모델과 일치하는 경우에 대해 제안기법의 성능을 평가하였다. 4.2절에서는 보다 더 큰 2차원 채널저류층에서 4가지 방향의 TI를 생성하여 초기양상불이 참조모델과 다른 방향성을 가지는 경우에 대해 제안방법을 적용하였다.

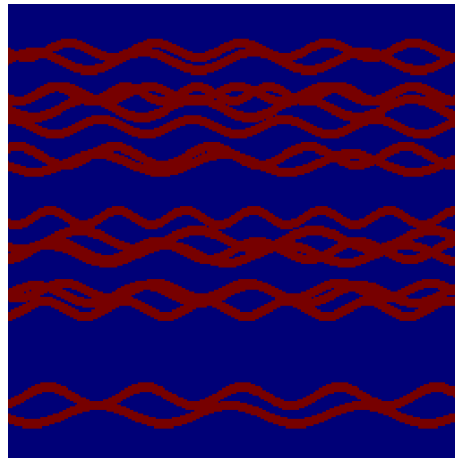
4.1 동일한 방향의 초기모델

EnKF와 NST-EnKF, 그리고 제안방법을 2차원 채널저류층에 적용하였다. 채널저류층의 저류층인자값은 이봉분포를 가지므로 EnKF의 정규분포 가정을 만족하지 않아 일반적인 EnKF로는 여러 가지 문제점이 발생할 수 있다. Shin 등(2010)과 Zhou 등(2012a, 2012b)이 연구한 NST-EnKF는 채널에 대한 방향성을 고려하지 않는다. 따라서 교정결과가 초기양상불의 영향을 크게 받으며 명확한 채널의 연결성과 패턴을 확보하기 어렵다. 4.1절에서의 연구목적은 다음과 같다.

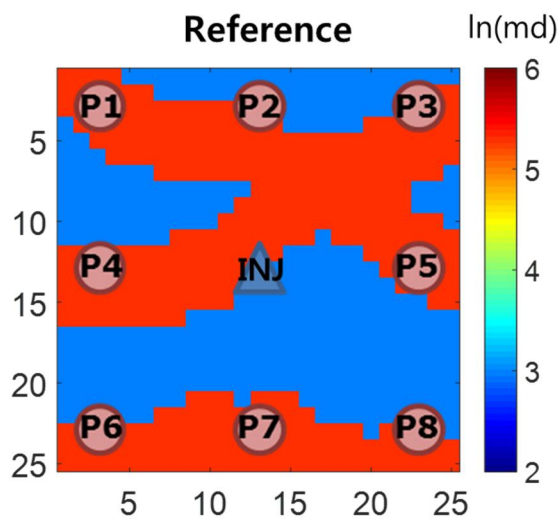
- 기존 방법들의 한계와 문제점 분석
- 초기양상불에 필터를 적용하여 연결성 개선결과 대한 분석
- 정규수치역변환(inverse normal score transform, INST)으로 저류층물성값의 이봉분포 유지

Fig. 4.1a는 채널저류층의 지질적 개념도인 TI이다. 동서방향으로 이어지는 사행천의 모습을 모사하였다. Fig. 4.1b는 참조모델로 TI와 유사한 연결성과 패턴을 나타낸다. 사암의 유체투과율은 200 md이며 셰일은 20 md의 값을 나타낸다. 중앙에 주입정이 있고 주변에 8개의 생산정이 있는 역 9점 물 주입공법(inverted nine spot pattern)이다. Table 4.1은 참조모델 및 양상불들의 저류층 정보이다.

Table 4.2는 유정의 위치와 유정별 생산조건이다. 주입정의 경우 일정한 물 주입량을, 생산정의 경우 일정한 공저압력 조건으로 오일을 생산한다. Table 4.3은 시뮬레이션을 위한 석유물리학적 물성값이다. 이와 같은 조건으로 1,000일간 생산할 경우 Fig. 4.2와 같다. 1, 2, 3, 4, 5번 유정은 사암채널로 주입정과 연결되어 있어 워터컷의 증가가 6, 7, 8번 유정보다 빠르다.



(a) Training image



(b) Reference model of channel reservoir

Fig 4.1 TI and reference model of case 1.

Table 4.1 Reservoir parameters of case 1.

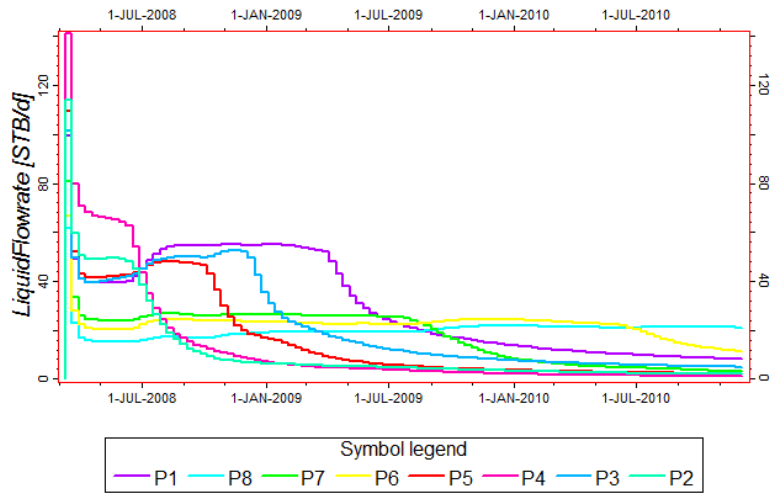
Parameters	Values
Grid system	25 by 25 by 1
Grid size (x, y, and z axis), ft	50, 50, 20
Ratio of sand to shale	0.5232
Permeability of sand, md	200
Permeability of shale, md	20
Standard deviation of sand, md	1.623
Standard deviation of shale, md	1.765
Porosity, fraction	0.2
Reservoir type	Black oil
Well pattern	Inverted nine spot
Production method	Water injection

Table 4.2 Well locations and operating conditions of case 1.

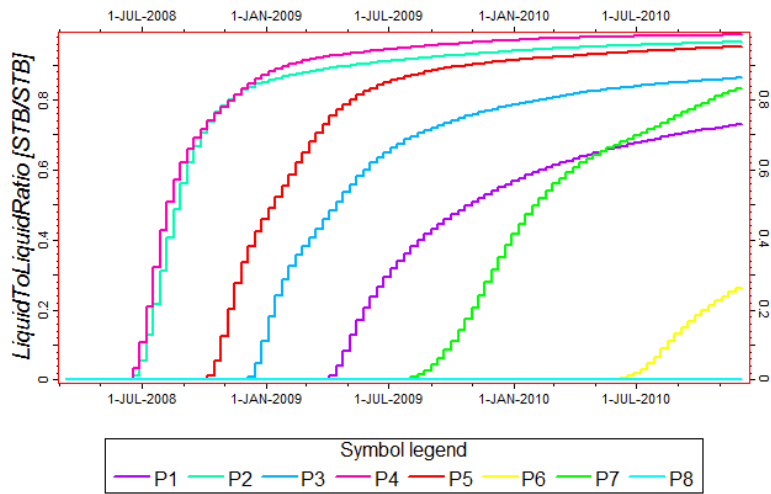
Well name	Location (x, y), ft	Control mode, STB/day or psi
I1	(625, 625)	Injection rate, 300
P1	(125, 125)	Bottom hole pressure, 500
P2	(625, 125)	
P3	(1125, 125)	
P4	(125, 625)	
P5	(1125, 625)	
P6	(125, 1125)	
P7	(625, 1125)	
P8	(1125, 1125)	

Table 4.3 Petrophysical parameters for simulation.

Parameters		Values
Total depth, ft		2,700
Oil-water contact, ft		3,000
Initial pressure, psi		2,000
Formation volume factor, rb/stb	Water	1 at 2,000 psig
	Oil	1.012 at 0 psig
		1.011 at 1,000 psig 1.01 at 2,000 psig
Density of fluid, lb/ft ³	Water	48.6
	Oil	62.3
Viscosity of fluid, cp	Water	1
	Oil	3
Compressibility, 1/psi	Water	5E-7 at 2,000 psig
	Oil	3E-5 at 2,000 psig



(a) Oil production rates



(b) Watercut

Fig. 4.2 Observed well data of the reference field: case 1.

각 유정위치의 데이터를 이용하여 100개의 초기양상블모델을 생성하였다. Fig. 4.3은 초기양상블들의 평균 유체투과율이다. 동일한 TI 를 사용하였기 때문에 수평방향으로 연결성이 강하게 나타나고 마치 참조모델과 유사하게 보인다. 하지만 주입정으로부터의 연결성과 전체 채널의 패턴이 명확하게 드러나지 않으며, Fig. 4.4의 개별 모델의 유체투과율은 참조모델과는 다른 패턴을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 4.5는 초기양상블의 유정별 오일생산량 및 워터컷을 1,000일 까지 예측한 결과이다. 회색 선은 각 개별양상블의 예측값을, 파란 선은 양상블들의 평균값을, 빨간 선은 참조모델의 관측값을 나타낸다. 회색 선이 일정한 폭을 가지며 파란 선이 빨간 선의 경향과 유사하게 나타나는 것이 가장 이상적인 결과이나, 초기모델만으로 예측한 결과는 범위가 너무 크고 양상블 평균 또한 참조모델의 관측값을 맞추지 못하였다. 특히 주입정과 6번, 7번, 8번 유정 사이의 세일지역을 정확히 나타내지 못하여 이른 물돌과 시점을 보여주었다(Fig. 4.5b).

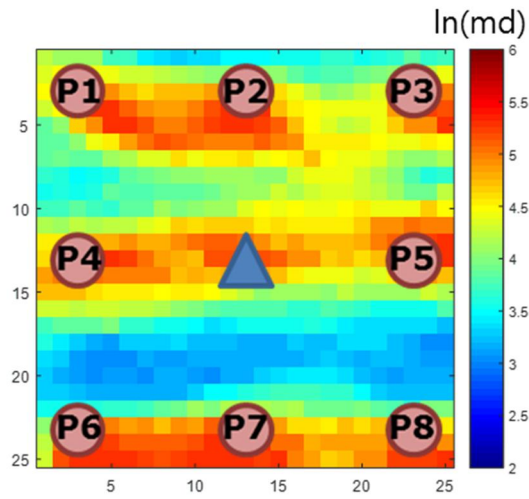


Fig. 4.3 Average log permeability of the initial ensemble in case 1.

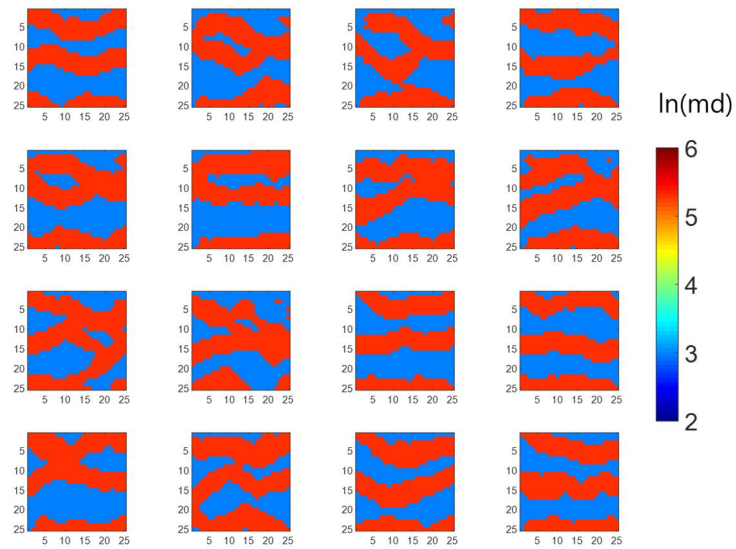
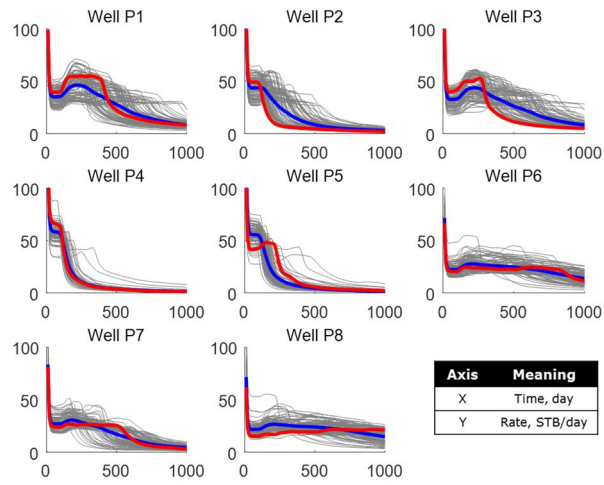
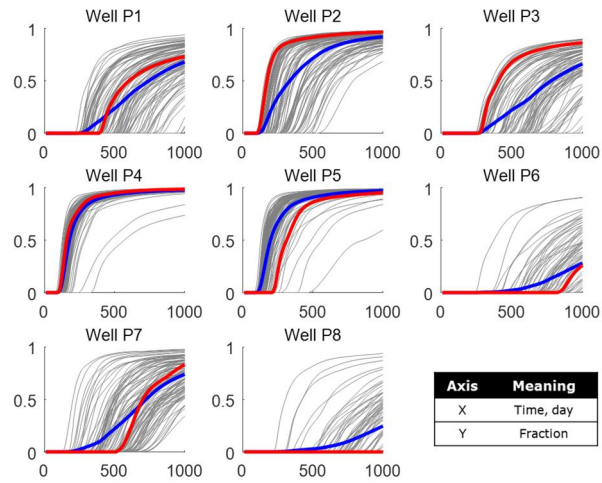


Fig. 4.4 Examples of log permeability field of the initial ensemble members.



(a) Oil production rate



(b) Watercut

Fig. 4.5 Predictions of well oil and water productions of the initial ensemble: case 1.

다음으로 생산정에서 관측한 500일간의 오일생산량을 이용하여 초기양상블의 히스토리매칭을 수행하였다. 일반적인 EnKF, NST-EnKF, 그리고 제안방법을 적용하여 결과를 비교하였다. 교정된 유체투과율 필드에서 연결성과 패턴을 확인하고 교정된 모델의 미래생산량을 예측하였다.

Fig 4.6은 각 방법들의 교정 후 평균 유체투과율이다. EnKF는 채널저류층의 연결성을 잘 보여주지만 일부 값들이 너무 높거나 낮게 예측되는 오버슈팅과 언더슈팅 문제가 발생하였다(Fig. 4.6b). 또한 하단의 사암체 부분에서 유정 주위 값을 너무 높게 예측하고 유정간 연결성이 끊어졌다.

NST-EnKF는 NST를 EnKF에 적용시켜 결과가 이봉분포로 나타났다. 하지만 사암과 셰일의 경계가 명확하지 않으며 셰일 사이에 사암이 존재하거나 주입정으로부터 3번 생산정으로의 연결성이 다소 약하게 나타났다(Fig. 4.6c). 오직 제안방법인 필터와 NST를 사용한 EnKF만이 전체 사암 연결성을 나타내고 채널의 경계를 명확하게 하였다. 또한 NST를 이용하여 EnKF의 오버슈팅 문제도 해결하였다(Fig. 4.6d).

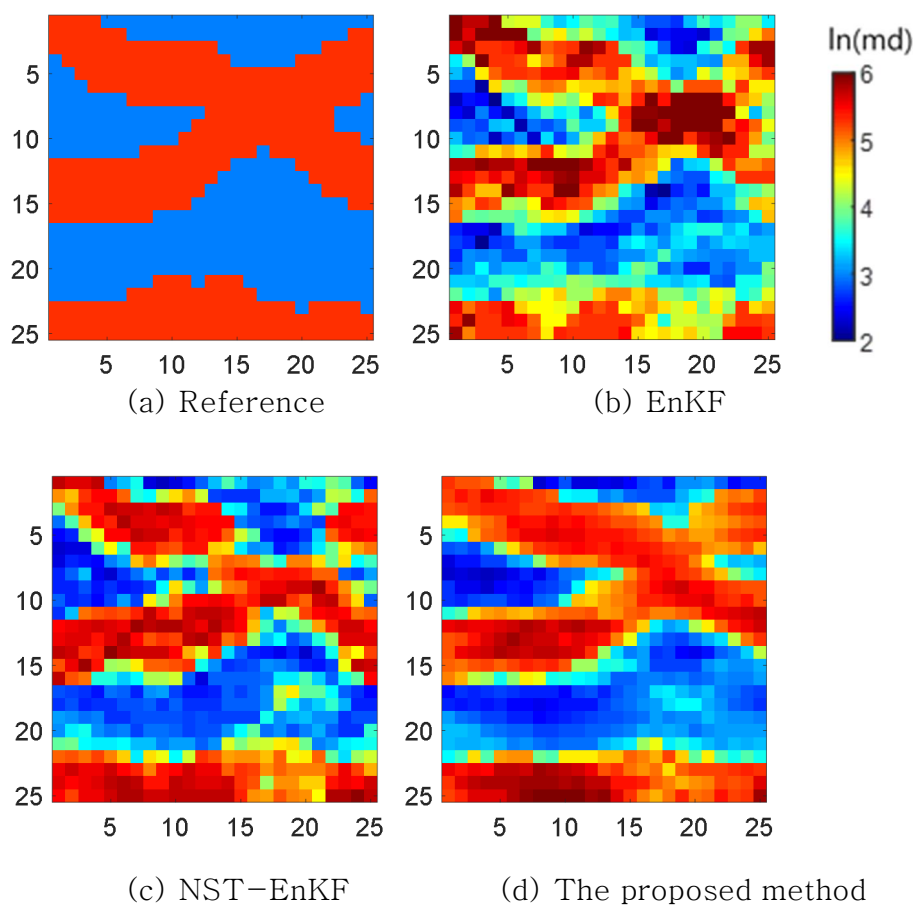


Fig. 4.6 The reference field and average log permeability fields updated by the three methods: case 1.

개별모델의 교정결과를 통해 각 방법의 특징과 장단점을 자세히 알아볼 수 있다. Fig. 4.7은 총 100개의 앙상블 중 21번째와 49번째의 앙상블의 유체투과율필드와 히스토그램이다. Fig. 4.7a는 초기모델이 아래쪽으로 강한 연결성을 가지고 있던 경우이다. EnKF로 교정한 결과 일부 값들이 너무 높게 예측되는 오버슈팅 문제가 발생하였다. 또한 하단으로의 연결성이 완전히 끊어지지 않았고, 교정결과가 정규분포에 가깝게 나타났다.

NST-EnKF는 채널저류층의 채널분포 정보를 이용하여 오버슈팅과 언더슈팅의 문제를 방지하고 교정결과가 이봉분포를 유지하였다. 하지만 초기모델의 하단으로의 연결성이 끊어지지 않았고 우측상단의 3번 유정으로의 연결성이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 제안한 방법은 EnKF의 오버슈팅 문제를 해결하고 교정결과가 이봉분포를 유지하였다. 또한 초기모델의 하단으로의 연결성을 제거하고 유정간 연결성을 명확히 확보하였다.

초기모델이 참조모델과 유사하지만, 약간의 차이를 가지고 있는 경우에 대해서도 분석해 보았다(Fig. 4.7b). EnKF는 이전과 동일하게 오버슈팅, 언더슈팅과 정규분포의 문제가 발생했다. NST-EnKF는 오버슈팅과 정규분포의 문제를 해결하였지만, 초기모델에서 많이 개선되지 못하고 오히려 하단 세일부분에서 사암이 생겨났다. 또한 3번 유정으로 끊어져 있던 연결성을 확보하지 못하여 교정이 거의 되지 않았다. 제안방법은 끊어져있던 3번 유정으로의 연결성을 확보하고 1번 유정 주위부분의 사암을

파악하였다.

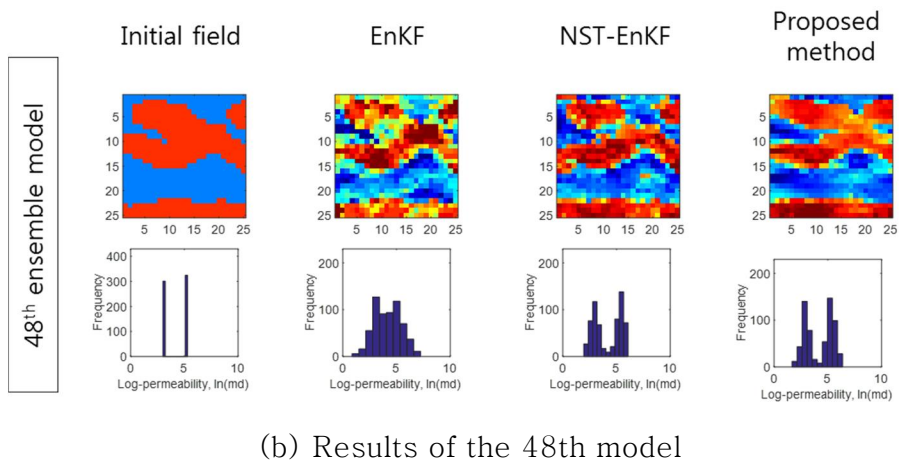
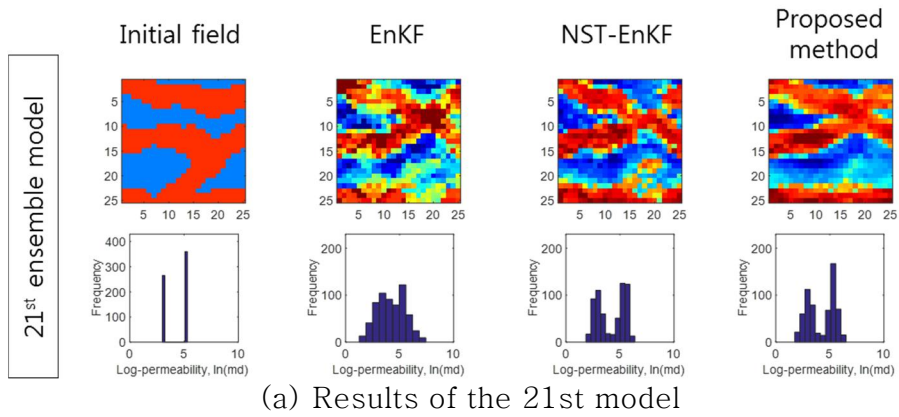
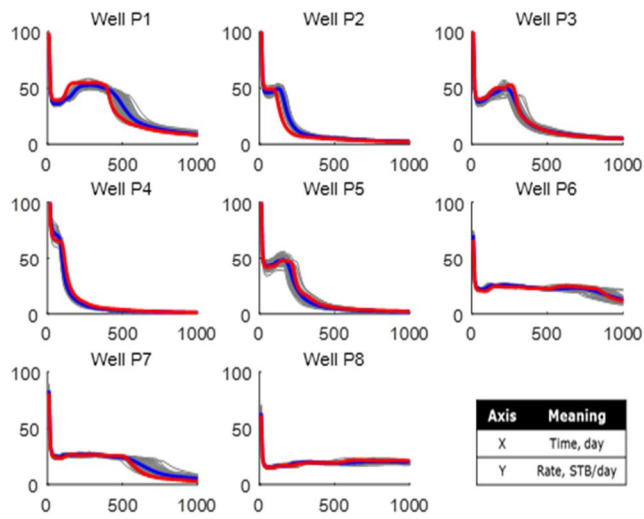


Fig. 4.7 Log permeability fields and their histograms of the updated ensemble members in case 1.

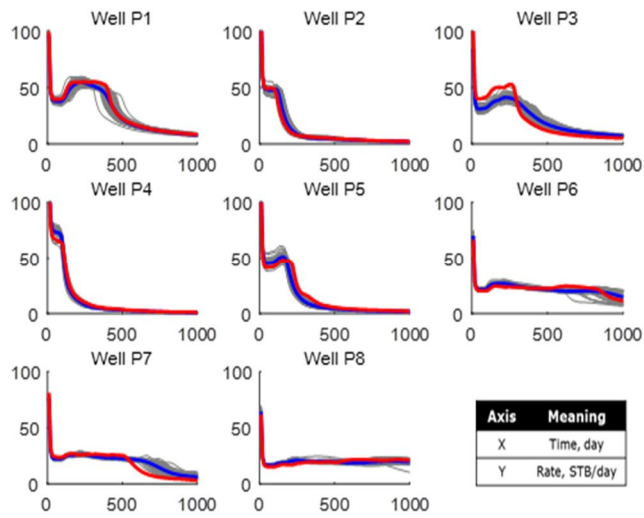
교정된 최종유체투과율 모델을 이용하여 미래생산량을 예측하였다. Fig 4.8은 각 방법으로 교정한 최종모델을 1,000일 동안 생산한 결과이다. EnKF 교정결과 초기양상불의 예측결과에 비해 불확실성 폭이 크게 줄었다(Fig. 4.8a). NST-EnKF는 3번 유정으로의 연결성을 정확하게 파악하지 못하여 오일생산량이 과대평가 되었다(Fig. 4.8b).

NST-EnKF보다 EnKF의 불확실성 폭이 더 작았다. 이는 EnKF는 오일생산량의 예측값과 참조모델의 관측값으로 계산한 추정오차공분산을 최소화하는 방향으로 교정하였지만, NST-EnKF는 추가적으로 NST를 사용하였기 때문이다. 유체투과율의 교정결과에서 NST-EnKF는 오버슈팅을 해결하고 채널을 명확히 구분하지만 오일생산량 예측은 EnKF가 더 뛰어날 수 있다(조흥근, 2016). 제안방법은 불확실성을 감소시키고 3번 유정과 하단의 세일로 분리된 6번, 7번, 8번 유정의 생산량을 잘 예측하였지만, 2번 유정의 생산량이 과대평가되었다(Fig. 4.8c).

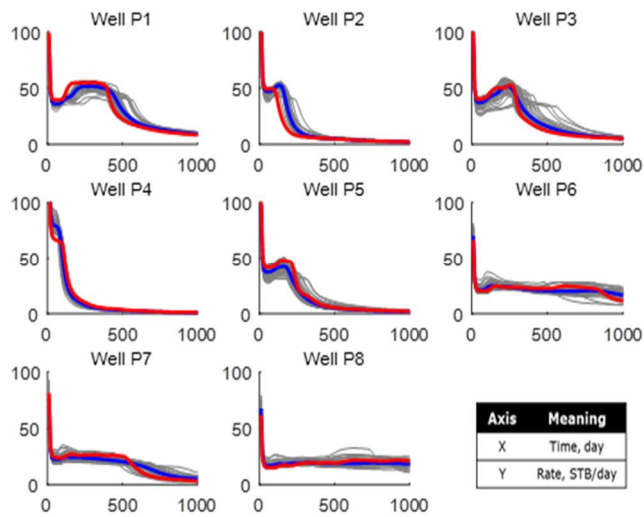
Fig. 4.9는 각 방법의 워터컷을 1,000일간 예측한 결과이다. NST-EnKF는 일부 유정에서 참조값을 포함하지 못하였지만(Fig. 4.9b), EnKF와 제안방법은 참조값을 불확실성 밴드폭 내에 모두 포함하였다(Figs. 4.9a, 4.9c).



(a) EnKF

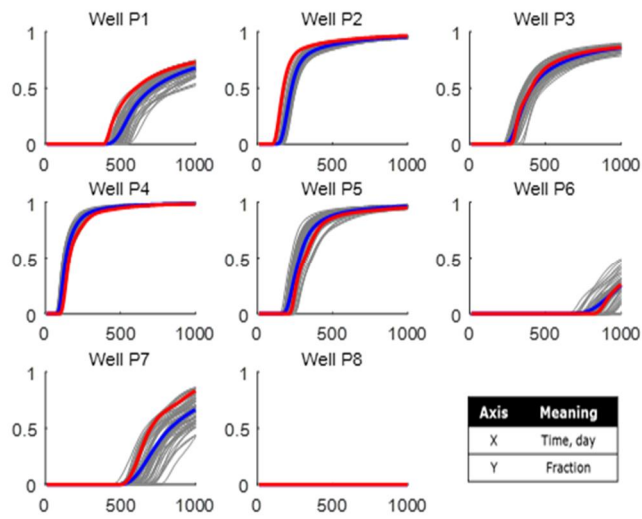


(b) NST-EnKF

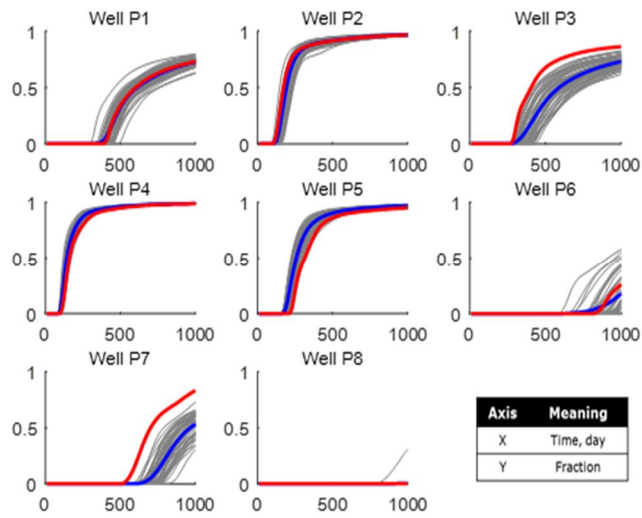


(c) The proposed method

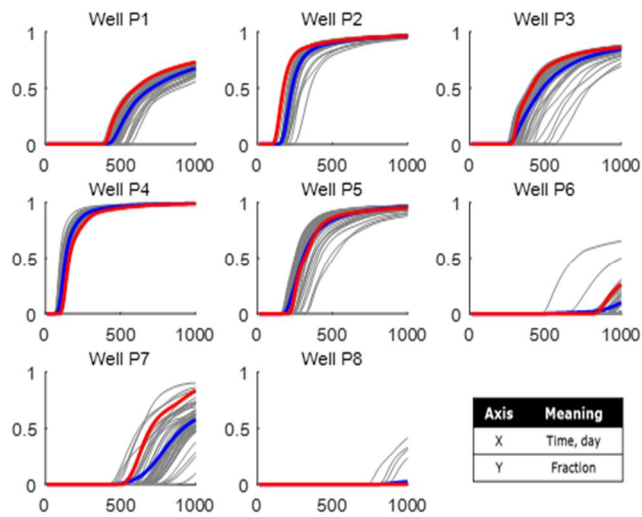
Fig. 4.8 Predictions of oil production rates of the updated ensembles
by the three methods: case 1.



(a) EnKF



(b) NST-EnKF



(c) The proposed method

Fig. 4.9 Predictions of watercut of the updated ensembles
by the three methods: case 1.

EnKF는 추정오차공분산을 최소화하는 방향으로 교정을 수행하여 불확실성의 폭을 줄였지만, 유체투과율 분포 내 오버슈팅이 발생하였고 결과가 정규분포의 형태로 나타나 본래 채널저류층의 분포특성을 보존하지 못하였다. NST-EnKF는 NST를 통해 채널의 분포특성을 보존하고 오버슈팅을 해결하였지만, 채널의 연결성과 세일 내부에 사암이 발생하는 등 지질적 특징을 맞추지 못하였다. 또한 미래생산량도 가장 잘 예측하지 못하였다.

제안방법은 EnKF의 오버슈팅과 정규분포 문제를 해결하였고, NST-EnKF에서 맞추지 못한 채널의 연결성과 패턴을 파악해내었다. 또한 미래생산량 예측결과도 참조값을 포함하였다. 비교한 세 방법의 적용결과를 Table 4.4에 정리하였다.

Table 4.4 Comparison of the three history matching methods in case 1.

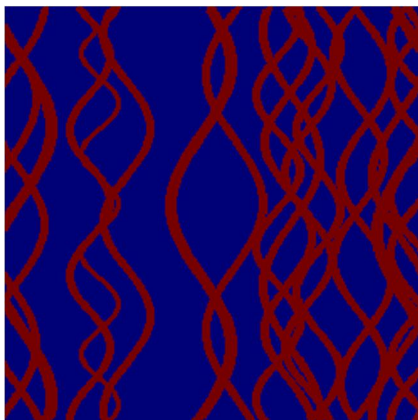
Feature	EnKF	NST-EnKF	The proposed method
Schemes	EnKF only	NST, EnKF	Filter, NST, EnKF
Gaussian assumption	Not satisfied	Satisfied	Satisfied
Overshooting problem	Occurred	Solved	Solved
Channel connectivity	Break off	Break off	Connected
Permeability distribution	Gaussian	Bimodal	Bimodal
Future performance	Good	Normal	Good

4.2 다양한 방향의 초기모델

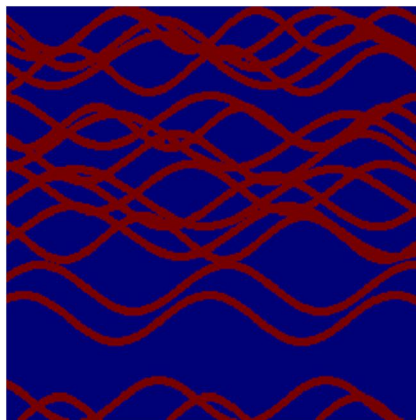
앞 절에서는 하나의 TI로부터 생성된 앙상블로 히스토리매칭을 수행하였다. 초기앙상블들의 평균이 참조모델과 유사하게 나타났고, 그 결과 방법 모두 채널저류층의 전반적인 패턴을 파악하여 상당한 수준으로 불확실성을 줄일 수 있었다.

이번 절에서는 4가지 다른 방향을 가진 TI로부터 생성된 앙상블을 이용하여 히스토리매칭을 수행한다. 참조모델이 속한 TI를 제외하고 나머지 TI로부터 만들어진 앙상블들은 사암층의 방향과 채널저류층의 패턴에서 차이를 보인다. 이와 같이 초기앙상블의 품질이 낮은 경우의 히스토리매칭을 위해 앞 절에서와 같이 세 방법을 적용하였다.

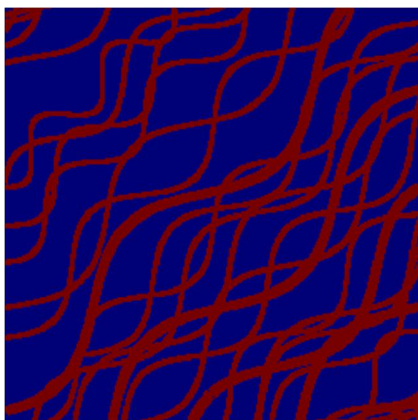
Fig. 4.10은 본 절에서 사용한 네 방향의 TI이다. 각 방향에서 초기앙상블을 25개씩 생성하고 참조모델은 0도의 TI로부터 생성하였다(Fig. 4.11). Table 4.5는 참조모델 및 초기앙상블 저류층 정보이고 Table 4.6은 주입정과 생산정의 위치 및 생산조건이다. Table 4.7은 시뮬레이션을 위한 물성값이다. 이러한 조건으로 1,000일간 생산할 경우 Fig. 4.12와 같다. 가장 가까이 연결된 2번과 7번에서 물돌파가 빨리 나타나고 5번, 3번 순으로 사암층을 따라 워터컷이 증가한다.



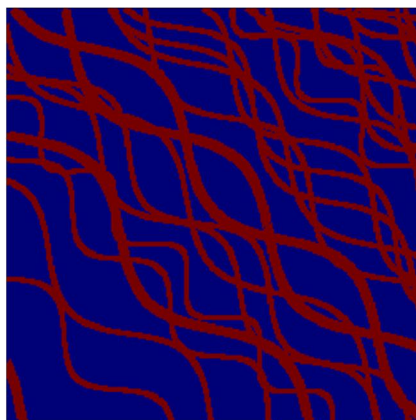
(a) 0 degree



(b) 90 degree



(c) 45 degree



(d) 135 degree

Fig. 4.10 Training images used in case 2.

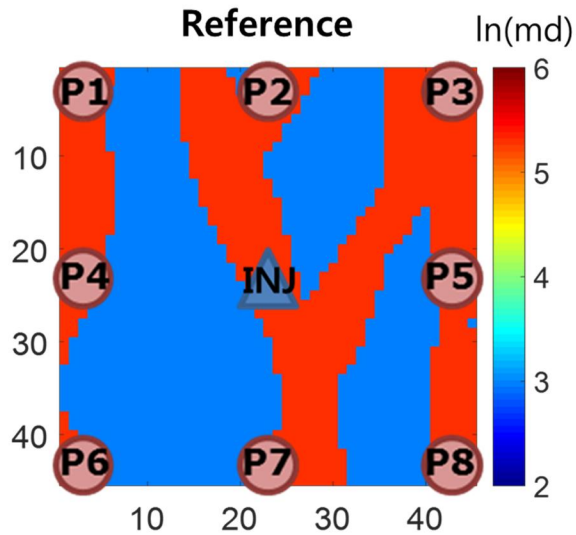


Fig. 4.11 Reference model of a channel reservoir in case 2.

Table 4.5 Reservoir parameters of case 2.

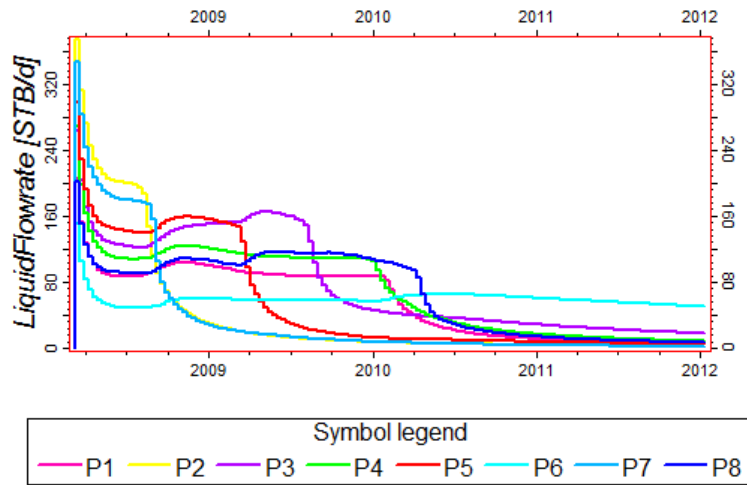
Parameters	Values
Grid system	45 by 45 by 1
Grid size (x, y, and z axis), ft	50, 50, 20
Ratio of sand to shale	0.4469
Permeability of sand, md	200
Permeability of shale, md	20
Standard deviation of sand, md	1.623
Standard deviation of shale, md	1.765
Porosity, fraction	0.2
Reservoir type	Black oil
Well pattern	Inverted nine spot
Production method	Water injection

Table 4.6 Well locations and operating conditions of case 2.

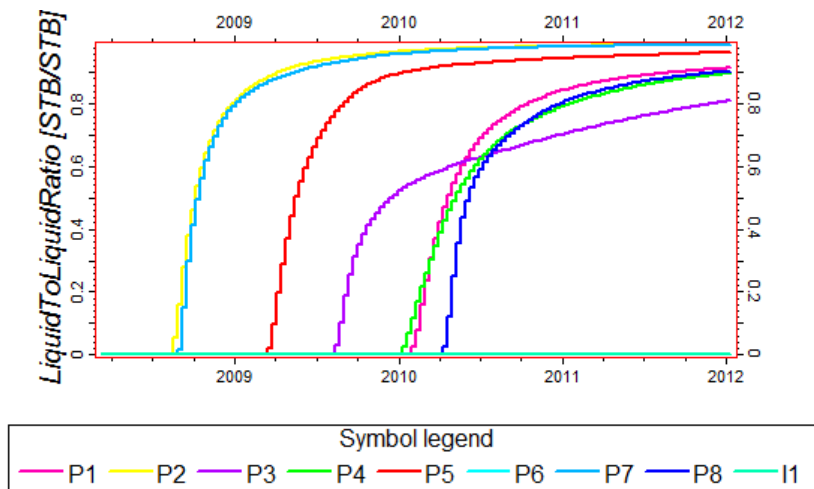
Well name	Location (x, y), ft	Control mode, STB/day or psi
I1	(1125, 1125)	Injection rate, 1000
P1	(25, 25)	Bottom hole pressure, 500
P2	(1125, 25)	
P3	(2225, 25)	
P4	(25, 1125)	
P5	(2225, 1125)	
P6	(25, 2225)	
P7	(1125, 2225)	
P8	(2225, 2225)	

Table 4.7 Petrophysical parameters for simulation.

Parameters		Values
Total depth, ft		2,700
Oil-water contact, ft		3,000
Initial pressure, psi		2,000
Formation volume factor, rb/stb	Water	1 at 2,000 psig
	Oil	1.012 at 0 psig
		1.011 at 1,000 psig 1.01 at 2,000 psig
Density of fluid, lb/ft ³	Water	48.6
	Oil	62.3
Viscosity of fluid, cp	Water	1
	Oil	3
Compressibility, 1/psi	Water	5E-7 at 2,000 psig
	Oil	3E-5 at 2,000 psig



(a) Oil production rates



(b) Watercut

Fig. 4.12 Observed well data of the reference field: case 2.

유정위치에서의 데이터와 다점지구통계기법을 이용하여 100개의 초기앙상블모델을 생성하였다. Fig. 4.13은 초기앙상블들의 평균 유체투과율이다. 이전 절에서는 하나의 방향성을 보였지만, 네 방향의 TI 를 사용한 앙상블의 평균은 어떠한 방향성도 띄지 않는다. Fig. 4.14는 개별 앙상블을 나타내며 초기앙상블이 다양한 방향성을 가진 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.15는 초기앙상블의 유정별 오일생산량 및 워터컷을 1,000일 까지 예측한 결과이다. Case 1에 비해 워터컷의 불확실성 폭이 더 증가한 것을 확인할 수 있으며, 이는 워터컷이 채널의 패턴과 연결성에 큰 영향을 받기 때문이다(Fig. 4.15b).

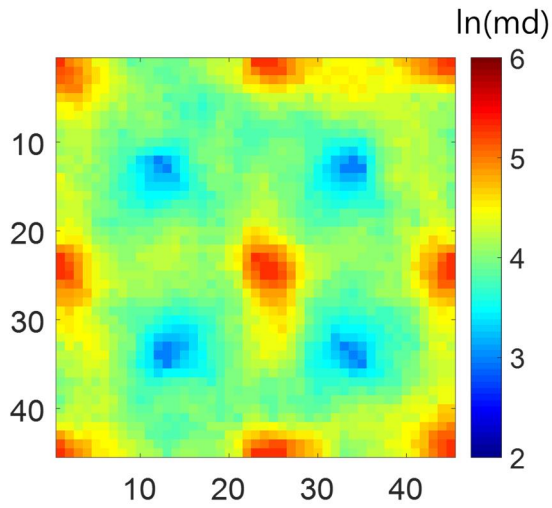


Fig. 4.13 Average log permeability of the initial ensemble in
case 2.

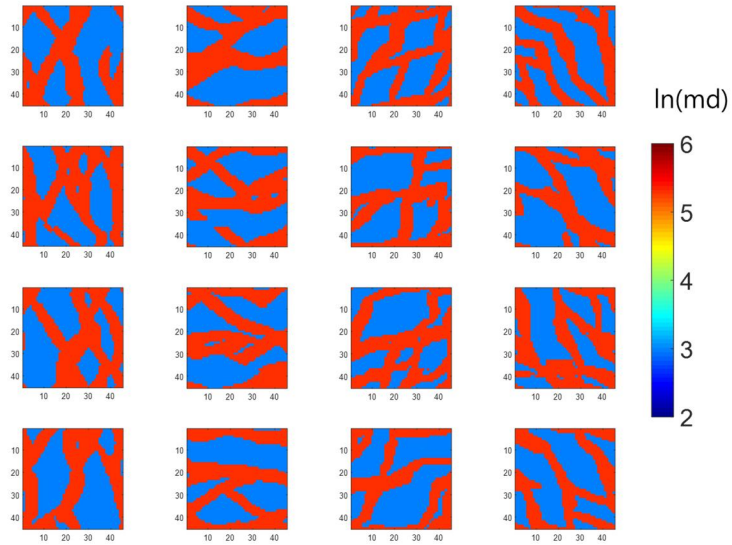
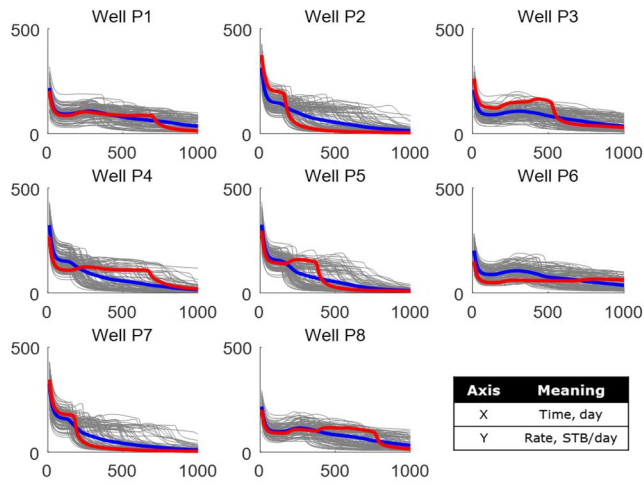
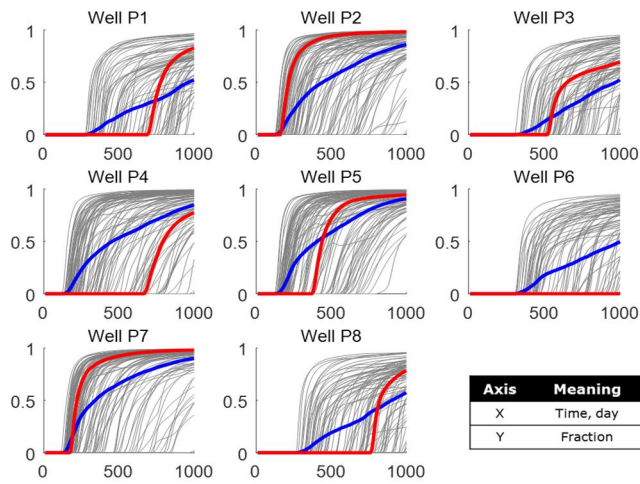


Fig. 4.14 Examples of log permeability fields
of the initial ensemble members.



(a) Oil production rate



(b) Watercut

Fig. 4.15 Predictions of well oil and water productions of the initial ensemble: case 2.

앞 결과 동일하게 500일간의 오일생산량을 이용하여 세 방법을 적용하였다. 초기양상블의 히스토리매칭 후 교정된 모델의 미래생산량을 예측하였다. 히스토리매칭 결과 평균 유체투과율은 Fig. 4.16과 같다. EnKF는 채널의 연결성을 확보하지 못하였을 뿐만 아니라, 사암과 셰일을 구분하기 어렵다(Fig. 4.16b). 이는 본래 초기양상블의 연결성이 영향을 미치기 때문이다. NST-EnKF도 EnKF에 비해 조금 더 셰일과 사암을 구분할 수 있지만 채널의 연결성을 확보하지 못하였다(Fig. 4.16c). 제안한 방법은 채널 내 셰일과 사암의 경계를 명확히 하고 채널의 방향과 연결성, 그리고 패턴을 보존하였다.

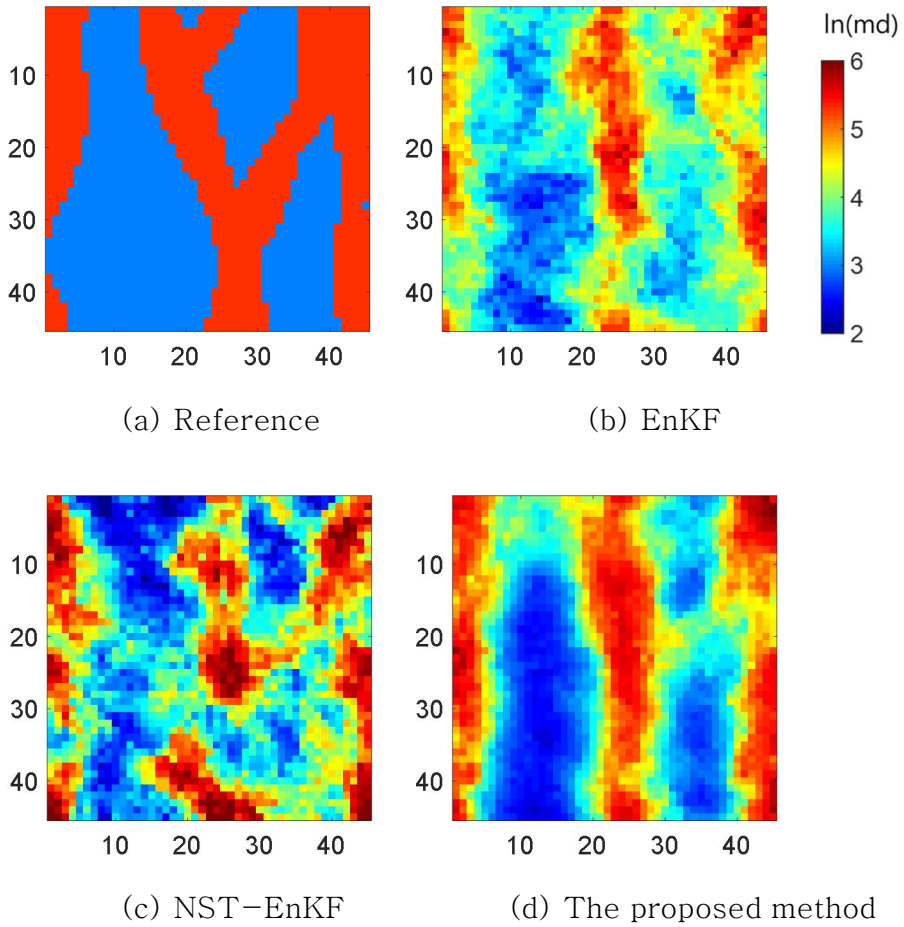


Fig. 4.16 The reference field and average log permeability fields updated by the three methods: case 2.

Fig. 4.17은 개별 양상블의 초기모델과 각 방법으로의 교정결과다. EnKF는 교정결과가 초기모양의 영향을 크게 받으며 오버슈팅이 심하게 일어나는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4.17b). 또한 사암과 셰일의 경계가 불분명하며 채널의 패턴을 알아보기 어렵다. NST-EnKF는 NST를 이용하여 이봉분포를 유지하고 오버슈팅 문제를 완화시켰다. 하지만 EnKF와 마찬가지로 교정결과가 초기모델의 영향을 많이 받으며 채널의 연결성을 확보하지 못하였다(Fig. 4.17c). 제안방법은 초기모델의 방향과 모양에 상관없이 수직방향으로의 연결성을 확보하고 사암과 셰일의 경계를 분명하게 구분지었다(Fig. 4.17d).

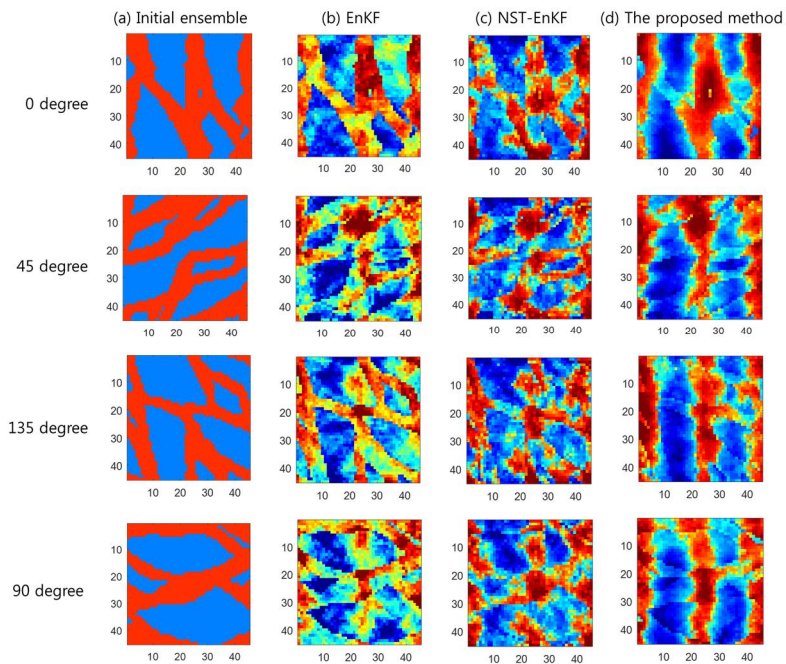
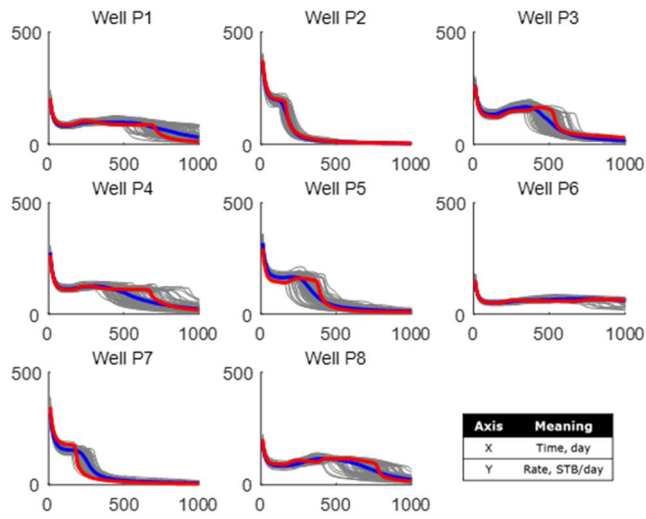


Fig. 4.17 Log permeability fields of the updated ensemble members.

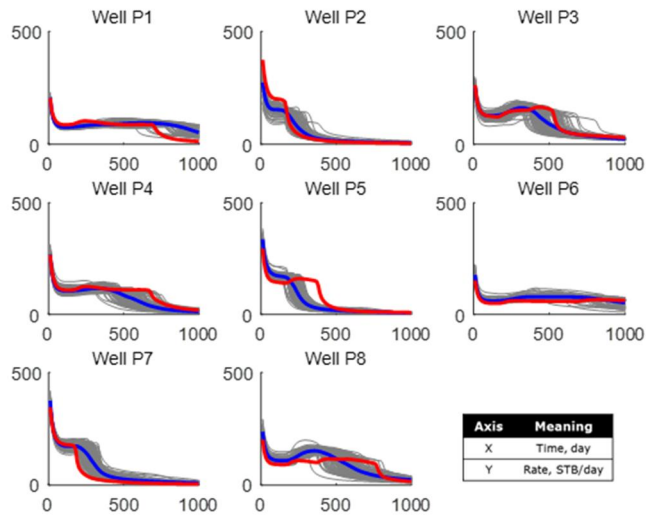
교정된 최종 유체투과율 모델로 미래생산량을 예측하였다. Fig. 4.18은 세 방법으로 교정한 최종모델을 1,000일 동안 생산한 결과이다. EnKF는 교정 후 초기양상불의 예측결과에 비해 불확실성 폭을 많이 줄였다(Fig. 4.18a). NST-EnKF는 이전 절의 case 1에 비해 성능이 더 감소한 것을 확인할 수 있었다. 대다수의 유정에서 생산량을 정확히 예측하지 못하였다(Fig. 4.18b).

제안방법은 다른 두 방법에 비해 오일생산량을 가장 잘 예측하였다. 주입정에서 사암층으로 가장 가깝게 연결된 2번과 7번 유정의 생산량을 정확히 예측하였으며, 나머지 유정도 불확실성 밴드폭 내부에 참조값을 포함하였다(Fig. 4.18c).

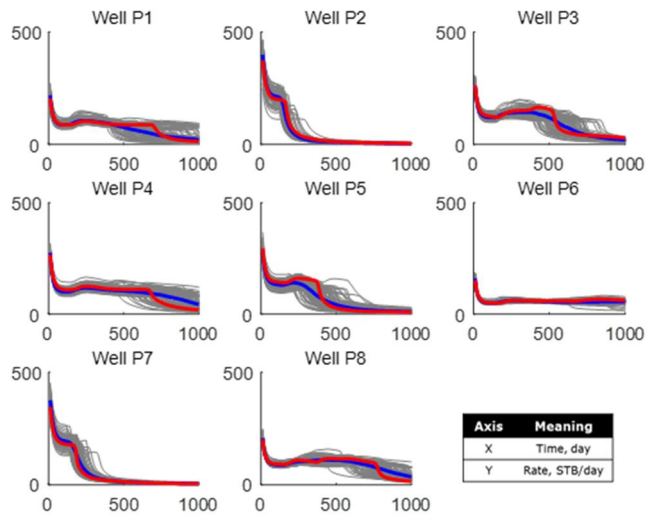
Fig. 4.19는 워터컷을 1,000일간 예측한 것이다. NST-EnKF는 불확실성 폭 내부에 참조값을 포함하지 못하였지만(Fig. 4.19b), EnKF와 제안방법은 참조값을 포함하여 불확실성 평가를 수행하였다. 또한 제안방법이 EnKF에 비해 불확실성의 오차가 더 작게 나타났다(Figs. 4.19a, 4.19c).



(a) EnKF

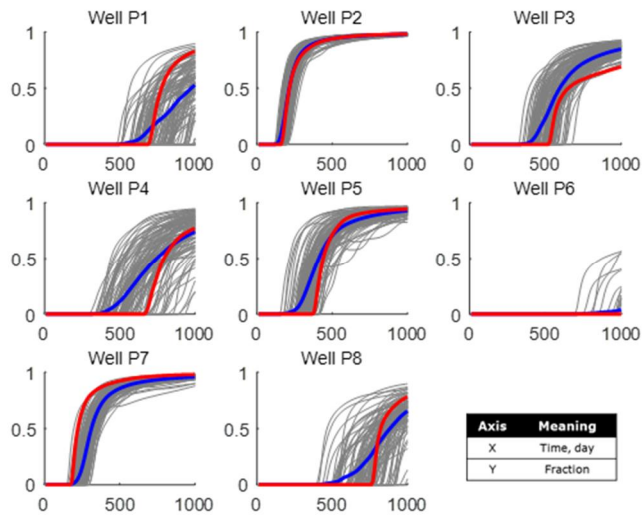


(b) NST-EnKF

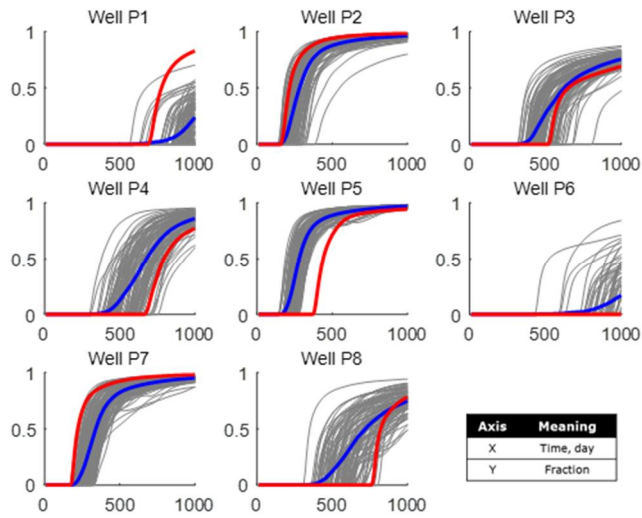


(c) The proposed method

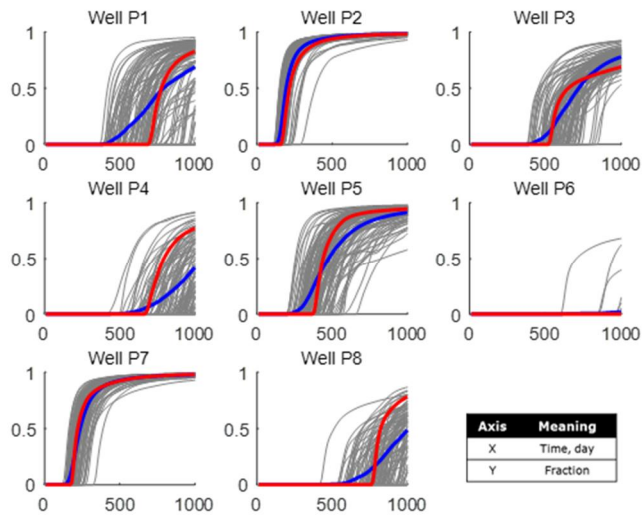
Fig. 4.18 Predictions of oil production rates of the updated ensembles by the three methods: case 2.



(a) EnKF



(b) NST-EnKF



(c) The proposed method

Fig. 4.19 Predictions of watercut of the updated ensembles
by the three methods: case 2.

EnKF는 오일생산량과 워터컷에 있어서 히스토리매칭에 성공하였지만, 유체투과율 분포를 정확하게 예측하지 못하였다. 이로 인해 채널의 경계와 패턴, 그리고 연결성을 확보할 수 없었다. 또한 오버슈팅이 발생하였고 결과가 정규분포로 나타났다. NST-EnKF는 이봉분포를 만족하고 오버슈팅을 해결하였지만, 채널의 패턴과 연결성을 개선시키지 못해 평균 유체투과율 결과가 선명하지 않다. 제안방법은 EnKF의 오버슈팅, 정규분포 가정을 해결하고 연결성과 패턴을 파악하였으며 가장 성공적으로 오일생산량과 워터컷을 예측하였다. 이를 정리하면 Table 4.8과 같다.

Table 4.8 Comparison of the three history matching methods in case 2.

Feature	EnKF	NST-EnKF	The proposed method
Scheme	EnKF only	NST, EnKF	Filter, NST, EnKF
Gaussian assumption	Not satisfied	Satisfied	Satisfied
Overshooting problem	Occurred	Solved	Solved
Channel connectivity	Break off	Break off	Connected
Permeability distribution	Gaussian	Bimodal	Bimodal
Future performance	Good	Bad	Very good

5. 결론

본 논문에서는 다점지구통계 기법을 사용한 정적자료통합과 앙상블기반의 동적자료통합을 수행하여 채널저류층을 특성화하였다. 교정된 최종 유체투과율을 사용하여 미래 석유생산량을 예측하였다. 효과적인 채널저류층 특성화를 위해 필터와 NST를 이용한 EnKF를 제안하였다.

EnKF, NST-EnKF, 그리고 제안방법을 초기앙상블이 참조모델과 같은 경우와 다른 경우에 대해 적용하였다. 세 가지 방법의 유체투과율 교정결과를 비교하고 교정된 필드로 미래생산량을 예측하여 불확실성을 평가하였다. 본 연구를 통해 다음의 결론을 도출하였다.

1. 특정방향으로의 선형필터를 정의하고 이를 초기앙상블에 적용하여 점수모델을 얻을 수 있다. 얻어진 점수모델을 사용하여 초기앙상블의 패턴과 연결성을 강화시킬 수 있다. 필터의 방향과 다른 방향으로의 패턴을 약화시켜 초기모델이 실제 참조모델과 다른 방향성을 갖는 경우에도 성공적으로 저류층 특성화를 수행할 수 있다. 또한 선형필터를 적용하였을 때 더 높은 값으로 나타나는 사암과 낮은 값으로 나타나는 셰일을 강조하여 채널의 경계를

명확하게 드러내고 사이에 발생하는 노이즈를 감소시킬 수 있었다.

2. 제안방법은 NST를 이용하여 EnKF의 정규분포 가정을 해결하였다. EnKF의 교정결과가 정규분포로 나타나는 문제 또한 INST를 이용하여 이봉분포로 변환함으로써 해결하였다. 선형필터를 처리한 저류층모델은 높고 낮은 부분이 구분되어 0과 1의 값만을 갖는 초기모델에 비해 NST를 사용하기에 더 용이하였다.

3. 제안방법은 채널저류층 특성화를 성공적으로 수행하였다. EnKF의 경우 히스토리매칭 과정에서 오버슈팅이 발생하고 채널저류층의 이봉분포를 보존하지 못한다. 또한 초기앙상블이 참조모델과 다른 방향성을 갖는 경우 채널 연결성을 잘 모사하지 못하는 한계가 있다. NST-EnKF의 경우 채널의 이봉분포를 보존하여 오버슈팅을 해결하지만, 채널의 연결성이 매우 떨어졌다. 이에 반해 제안방법은 오버슈팅을 해결하고 성공적으로 채널 연결성과 패턴을 보존하였다.

4. 제안방법을 통해 신뢰할 수 있는 미래 생산량을 예측할 수 있다. EnKF의 경우 초기앙상블이 참조모델과 다른

방향성을 갖는 경우 편향된 예측결과를 보였다. NST-EnKF는 가장 안 좋은 예측결과를 보였다. 반면 제안방법은 안정적인 생산량 예측과 불확실성 평가를 제공하였다.

본 연구를 토대로 발전시킬 수 있는 연구들은 다음과 같다.

- 초기모델 생성 시 사암과 셰일영역에 각각의 정규분포를 할당하여 초기모델을 생성할 수 있다. 실제 자연인자들은 대부분 로그정규분포를 따르므로 초기모델의 의미를 살릴 수 있다.
- 채널의 비율을 고정하지 않고 EnKF의 교정인자로 추가하여 연구를 진행할 수 있다. 실제 참조모델의 비율을 알고 있다고 가정하였으므로 비율을 모르는 경우에도 참조 값을 맞출 수 있는 연구가 필요하다.
- 3차원 채널저류층에 해당 방법을 적용하여 범용성을 확인할 수 있다. 벤치마크 모델인 Egg-model에 3차원 필터를 정의하여 해당방법을 적용한 연구를 수행할 수 있다.
- 방향성을 알지 못하는 참조모델에 대해 다양한 방향의 초기모델에 다양한 방향 필터를 적용하여 참조모델의 방향을 추정하는 연구를 수행할 수 있다. 이를 통해 지질정보가 주어지지 않은 경우에도 성공적으로 저류층을 특성화할 수 있다.

참고문헌

이경복. 2014. 거리기반 앙상블스무더를 이용한 채널저류층 특성화. 공학박사 학위논문, 서울대학교, 서울.

이용일. 1993. 석유지질학. 서울: 민음사. pp. 150-153.

이충호. 2016. Characterization of Channelized Gas Reservoir with an Aquifer Using EnKF and DCT. 공학석사 학위논문, 서울대학교, 서울.

정승필. 2008. 앙상블칼만필터를 이용한 균열저류층 특성화. 공학박사 학위논문, 서울대학교, 서울.

조홍근. 2016. 앙상블칼만필터와 채널정보교정을 이용한 채널저류층 특성화. 공학석사 학위논문, 서울대학교, 서울.

최종근. 2013. 지구통계학. 서울: (주)시그마프레스. pp. 96-97, 253-261.

Bjørlykke, K. 2010. Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 113-114.

Caers, J., and Zhang, T. 2004. Multiple-point geostatistics: a quantitative vehicle for integrating geologic analogs into multiple reservoir models. AAPG Memoir 80: Integration of Outcrop and Modern Analogs in Reservoir Modeling, ed. G.M. Grammer, P.M. “Mitch” Harris, and G.P. Eberli. pp. 383-394. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists.

Evensen, G., Hove, J. Meisingset, H.C., Reiso, E., Seim, K.S., and Espelid, Ø. 2007. Using the EnKF for Assisted History Matching of a North Sea Reservoir Model. Paper SPE 106184 presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, Texas, 26-28 February.

Gettyimages. <http://www.gettyimages.com/>.

Gu, Y. and Oliver, D.S. 2004. History Matching of the PUNQ-S3 Reservoir Model using the Ensemble Kalman Filter. Paper SPE 89942 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 26-29 September.

Gu, Y. and Oliver, D.S. 2006. The ensemble Kalman filter for continuous updating of reservoir simulation models. Transactions of the ASME 128(1). pp. 79-87. New York City: American Society of Mechanical Engineers.

Guardiano, F.B. and Srivastava, R.M. 1993. Multivariate geostatistics: beyond bivariate moments. In A.O. Soares, ed., *Geostatistics Tróia*. Heidelberg, Germany: Springer Netherlands. pp. 133-144.

Hyne N.J. 2012. *Nontechnical guide to petroleum geology, exploration, drilling, and production*, second edition. Tulsa, Oklahoma: PennWell. pp. 73-84.

Jafarpour, B. and McLaughlin, D.B. 2007. Efficient permeability parameterization with the discrete cosine transform. Paper SPE 106453 presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, Texas, USA, 26-28 February.

Jafarpour, B. and McLaughlin, D.B. 2008. History matching with an ensemble Kalman filter and discrete cosine parameterization. *Computational geosciences* 12(2). pp. 227-244.

Jafarpour, B. and McLaughlin, D.B. 2009. Reservoir characterization with the discrete cosine transform. *SPE Journal* 14(1). pp. 182-201.

Kalman, R.E. 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME* 128(1). pp. 35-45. New York City: American Society of Mechanical Engineers.

Kim, S., Lee, C., Lee, K., and Choe, J. 2016. Characterization of channelized gas reservoirs using ensemble Kalman filter with application of discrete cosine transformation, *Energy Exploration & Exploitation* 34(2). pp. 319-336.

Lee, K., Jo, G., and Choe, J. 2011. Improvement of ensemble Kalman filter for improper initial ensembles. *Geosystem Engineering* 14 (2): 79-84.

Lee, K., Jeong, H., Jung, S., and Choe, J. 2013a. Characterization of channelized reservoir using ensemble Kalman filter with clustered covariance. *Energy Exploration & Exploitation* 31(1). pp. 17-29.

Lee, K., Jeong, H., Jung, S., and Choe, J. 2013b. Improvement of ensemble smoother with clustering covariance for channelized reservoirs. *Energy Exploration & Exploitation* 31(5). pp. 713-726.

Lee, K., Jung, S., Shin, H., and Choe, J. 2014. Uncertainty quantification of channelized reservoir using ensemble smoother with selective measurement data. *Energy Exploration & Exploitation* 32(5). pp. 805-816.

Mariethoz, G., and Caers, J. 2014. Multiple-Point Geostatistics: Stochastic Modeling with Training Images, First Edition. John Wiley

& Sons, Ltd.

Nævdal, G., Mannseth, T., and Vefring, E.H. 2002. Near-well reservoir monitoring through ensemble Kalman filter. Paper SPE 75235 presented at the SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, 13-17 April.

Reading, H. G. 1996. Sedimentary Environments and Facies, Blackwell Scientific Publications.

Shin, Y., Jeong, H., and Choe, J. 2010. Reservoir characterization using an EnKF and a non-parametric approach for highly non-Gaussian permeability fields. *Energy Sources, Part A* 32(16). pp. 1,569-1,578.

Strebelle, S.B. and Journel, A.G. 2001, Reservoir modeling using multiple-point statistics. Paper SPE 71324 presented at Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 30 September-3 October.

Watanabe, S., Datta-Gupta, A., Efendiev, Y., and Devegowda, D. 2009. A hybrid ensemble Kalman filter with coarse scale constraint for nonlinear dynamics. Paper SPE 124826 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 4-7 October.

Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/>.

Wu, J., Boucher, A., Journel, A.G. 2006. A 3D code for mp simulation of continuous and categorical variables: FILTERSIM. Stanford University, Stanford, California.

Zhou, H., Li, L., Franssen, H. J. H., and Gómez-Hernández, J.J. 2012a. Pattern Recognition in a Bimodal Aquifer Using the Normal-Score Ensemble Kalman Filter. *Mathematical Geosciences* 44(2). pp. 169–185.

Zhou, H., Li, L., and Gomez-Hernandez, J.J. 2012b. Characterizing Curvilinear Features Using the Localized Normal-Score Ensemble Kalman Filter. *Abstract and Applied Analysis* 2012.

ABSTRACT

Characterization of Channel Reservoirs Using Ensemble Kalman Filter with Normal Score Transform

Jungyu Park

Department of Energy Systems Engineering

Seoul National University

Reservoir characterization is important to predict future productions and make reasonable decisions. Ensemble Kalman filter (EnKF) is a history matching method to calibrate reservoir characteristics in real time using multiple reservoir models (ensemble) and to evaluate the uncertainty of future productions.

Channel reservoir consists of two facies of sandstone and shale, and the reservoir properties do not follow a normal distribution. Since EnKF assumes a normal distribution, permeability cannot be reasonably characterized in a channel reservoir using EnKF only.

This study proposes EnKF using a filter and normal score transform (NST) to characterize channel reservoirs. The filter can be used to enhance channel connectivity in certain directions of the reservoir and NST manages the normal distribution assumption of EnKF. In addition, a bimodal distribution is preserved by inverse normal score transform.

The proposed method is applied to cases where the initial reservoir model has the same and different directivity as the reference model. As a result, over-shooting and under-shooting are solved, the bimodal distribution of channel reservoirs is maintained, and channel connectivity and pattern are reliably grasped. Therefore, the proposed method can successfully characterize channel reservoirs and predict future productions of oil and water, which can be useful for decision making in channel reservoir development.

Key words: channel reservoir characterization, ensemble Kalman filter, normal score transform, filter

Student number: 2015-21318